CONVIVENCIA Y DENSIDAD DE POBLACION • LIMITACIONES DE LAS MEMORIAS MAGNETICAS

INVESTIGACION y CIENCIA

JULIO 2000
800 PTA. 4,81 EURO

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

Hidrógeno metálico

BOSQUE MEDITERRANEO

LA PLATA DEL PERU

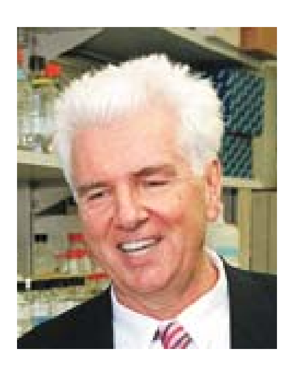
ASTEROIDES

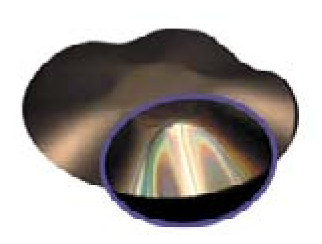




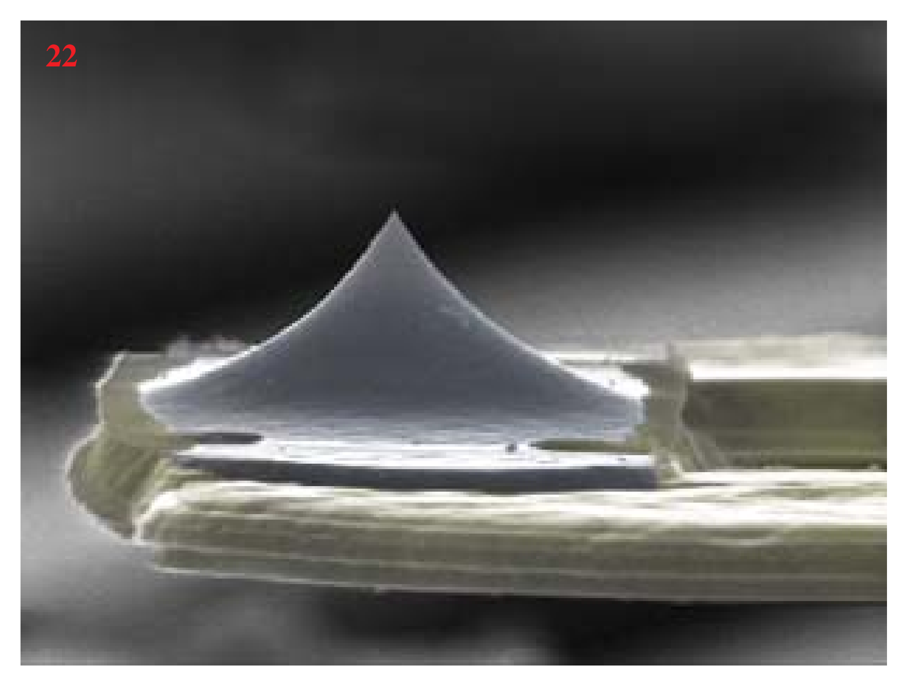
Julio de 2000 Número 286

SECCIONES













Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

SECCIONES



Portada: Bryan Christie

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
5	Laboratorio de Física Aplicada, Universidad Johns Hopkins y NASA
6	Laurie Grace, fuente: Petr Pravec
7	Laboratorio de Física Aplicada, Universidad Johns Hopkins y NASA
8-9	Scott Hudson (*Castalia*), Ben H. Zellner y NASA (*Vesta*), Laboratorio de Física Aplicada, Universidad Johns Hopkins y NASA (*Eros* y *Mathilde*), NASA/ Laboratorio de Propulsión a Chorro (*Gaspra* e *Ida*)
10-11	Bryan Christie
12	NASA/JPL
14-15	Brian Peterson, *Weststock*
16-17	Frans B. M. de Waal (*fotografías*); Bryan Christie (*gráficos*)
18	Chuck Savage, *The Stock Market* (*fotografía*); Bryan Christie (*gráficos*)
19	Frans B. M. de Waal
22	Tom Draper Design, fuente: *Magnetic Recording: The first 100 years*, editado por E. D. Daniel et al, IEEE Press, 1999
23	Bryan Christie, fuente: Disk/Trend
24-25	George Retseck, fuente: *How Computers Work* de Ron White, cuarta edición, Que Corporation, 1998
26-27	George Retseck
28	George Retseck, fuente: *How Computers Work* de Ron White, cuarta edición, Que Corporation, 1998
29	George Retseck; IBM (*micrografía*)
31	George Retseck
32	George Retseck; HEWLETT-PACKARD (*micrografía*)
33	George Retseck; IBM (*micrografía*)
49	Slim Films
50-51	Slim Films (*arriba y derecha*); cortesía de William J. Nellis (*fotografía*)
52-54	Slim Films
57-60	Carlos Serrano
62-69	Spektrum der Wissenschaft
71-75	Juan F. Gallardo Lancho, M. Amparo Vicente y Gerardo Moreno
78	D. Cardon (*arriba*); Fundación Abegg, Riggisberg, Suiza (*abajo*)
79	Museo Histórico de Tejidos, Lyon
80	D. Cardon
81	Gaëtan du Chatenet
82	Paul Starosta (*izquierda*); D. Cardon (*centro y derecha*)
83	D. Cardon
84-85	Daniels & Daniels
86-87	Bryan Christie
88-89	Bryan Christie, fuente: Husky Corporation

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Mónica Murphy: *Planetas en miniatura*; José M. García de la Mora: *Problemas de la masificación*; Luis Bou: *La crisis de las memorias masivas* y *Juegos matemáticos*; Carlos Serrano: *La plata del Perú*; Jürgen Goicoechea: *La reproducción de experimentos históricos*; Agustí Nieto Galán: *Las tinturas naturales*; Angel Garcimartín: *Perfiles*; J. Vilardell: *Hace...*, *Taller y laboratorio* e *Ideas aplicadas*; José M.ª Valderas Martínez: *Nexos*

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (España)
Teléfono 93 414 33 44 Telefax 93 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
MANAGING EDITOR Michelle Press
ASSISTANT MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
NEWS EDITOR Philip M. Yam
SPECIAL PROJECTS EDITOR Gary Stix
ON-LINE EDITOR Kristin Leutwyler
SENIOR WRITER W. Wayt Gibbs
EDITORS Mark Alpert, Carol Ezzell, Steve Mirsky, Madhusree Mukerjee, George Musser, Sasha Nemecek, Sarah Simpson y Glenn Zorpette
PRODUCTION William Sherman
VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL Charles McCullagh
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Gretchen G. Teichgraeber
CHAIRMAN Rolf Grisebach

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 93 414 33 44
Fax 93 414 54 13

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	8.800 pta.	16.000 pta.
	52,89 euro	96,16 euro
Extranjero	11.500 pta.	21.500 pta.
	69,12 euro	129,22 euro

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 800 pta. 4,81 euro
Extraordinario: 1.000 pta. 6,01 euro

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
Aragoneses, 18 (Pol. Ind. Alcobendas)
28108 Alcobendas (Madrid)
Tel. 91 484 39 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono 93 414 33 44

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Francisca Martínez Soriano
Menorca, 8, semisótano, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. 91 409 70 45 – Fax 91 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. 93 321 21 14
Fax 93 414 54 13

Difusión controlada

ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Filmación y fotocromos reproducidos por Dos Digital, Zamora, 46-48, 6ª planta, 3ª puerta - 08005 Barcelona
Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

HACE...

...cincuenta años

TABACO: UN INFORME DECISIVO. «A menudo se ha sospechado del tabaco como cómplice en el gran aumento del cáncer de pulmón desde 1900. Pero las pruebas eran fragmentarias y contradictorias. Un informe sólidamente documentado publicado en *Journal of the American Medical Association* presenta lo que parece ser la prueba más convincente de que fumar puede causar cáncer. Ernest L. Wynder y Evarts A. Graham, de la facultad de medicina de la Universidad de Washington, han descubierto en una encuesta a escala nacional sobre 605 varones con cáncer de pulmón que un 96,5 por ciento de éstos fumaron al menos 10 cigarrillos diarios durante muchos años, mientras que en la población hospitalaria masculina general sin cáncer sólo resultaron ser fumadores un 73,7 por ciento.»

PLUTÓN. «El más exterior de los planetas del sistema solar tiene una masa 10 veces menor de lo que se creía, según las mediciones de Gerard P. Kuiper, del Observatorio Yerkes, efectuadas con el telescopio de 508 cm de monte Palomar. Tomando como base las desviaciones en la trayectoria del planeta Neptuno, atribuidas a la atracción gravitatoria de Plutón, solía estimarse que la masa de éste era aproximadamente la de la Tierra. Kuiper ha sido el primer humano en considerar a ese planeta como algo más que un punto luminoso. Según sus cálculos, Plutón tiene un diámetro de unos 5800 kilómetros y una masa que es la décima parte de la terrestre. Queda por resolver el misterio de las perturbaciones de Neptuno, demasiado grandes para que sea responsable de ellas un planeta tan pequeño como Plutón.»

CODICIA. «¿Es la avaricia una tendencia natural o un hábito adquirido? Louise C. Licklider y J. C. R. Licklider, psicólogos de Harvard, dieron a seis ratones todas las píldoras de purina que pudieron comer. Aunque ninguno de los animalitos había hasta entonces padecido falta de comida, todos empezaron enseguida a acumular píldoras. Los Licklider refinaron el experimento envolviendo en papel de aluminio la mitad de las píldoras, inutilizándolas así como alimento. Descubrieron entonces que cuatro de los seis avariciosos ratones prefirieron acumular las inútiles píldoras incomestibles.»

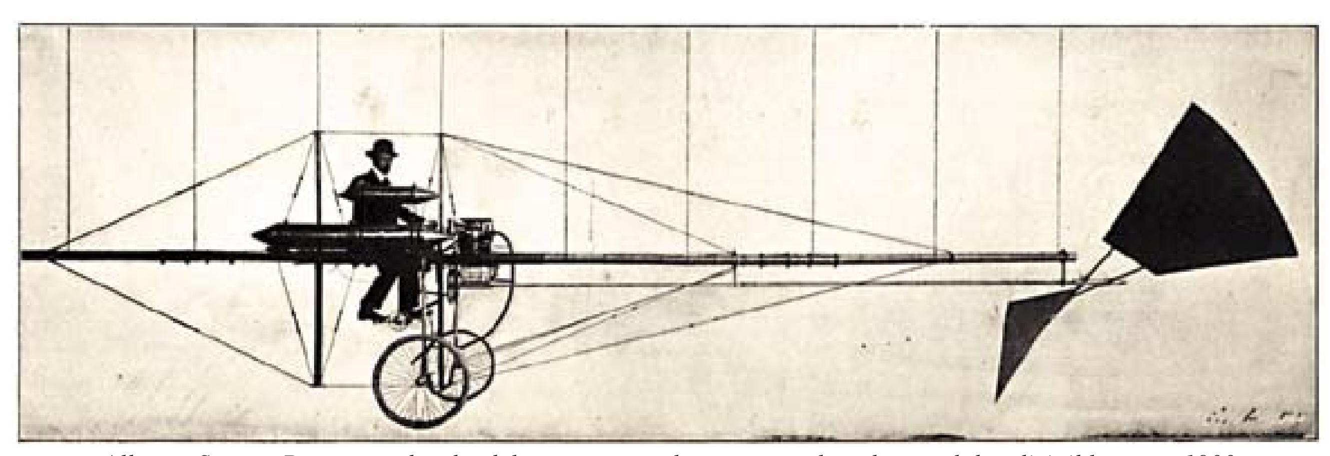
...cien años

AERONAUTA PIONERO. «M. De Santos Dumont [*sic*] terminó recientemente la nueva nave aérea con la que competirá por el premio Deutsch del Aero Club para el primer vuelo desde el Bois de Boulogne hasta la Torre Eiffel y vuelta. El aeronauta y su mecanismo propulsor cuelgan de una funda rellena de gas (*véase ilustración*). El motor de gasolina arranca mediante un pedal y una transmisión por cadena. El cilindro superior contiene gasolina para el motor y en el inferior hay un depósito de agua que sirve de lastre.» [*Nota de la Redacción: El brasileño Alberto Santos Dumont ganó el premio Deutsch el 19 de octubre de 1901.*]

...ciento cincuenta años

EL INVEROSÍMIL PHINEAS GAGE. «El profesor Bigelow, de la Universidad de Harvard, nos facilita las últimas noticias sobre un muchacho de nombre Phineas P. Gage al que una enorme barra de hierro atravesó el cerebro en septiembre de 1848 y que, por raro que parezca, *vive* y goza de buena salud. 'Lo más característico de este caso', dice el profesor Bigelow, 'es su inverosimilitud'. Afirma el profesor B. que él fue 'al principio un escéptico radical', pero que personalmente se convenció. El señor Gage visitó Boston en enero y durante algún tiempo estuvo bajo observación del profesor, quien le rasuró la cabeza y tomó un molde de ésta, el cual, junto con el hierro agresor, se halla ahora depositado en el Museum College.»

NUEVO RUMBO DE LA NATURALEZA. «No hace sino un poco más de veinte años que el primer cuervo atravesó el río Genesse en dirección a poniente. El cuervo, el zorro, el halcón gallinero, la golondrina y otras aves e insectos parecen acompañar a la civilización. El gorgojo del grano inició su curso de destrucción en Vermont en torno al año 1828 y avanza de quince a veintidós kilómetros al año. Aún no ha llegado al oeste de Nueva York, pero la plaga sigue su marcha y la desolación se cierne sobre la región triguera.»



Alberto Santos Dumont a bordo del grupo propulsor que cuelga de su globo dirigible; año 1900

Planetas en miniatura

En los asteroides actúa un delicado entramado de pequeñas fuerzas que no admiten fácil simulación en los laboratorios terrestres

Erik Asphaug

Mis amigos y yo, niños de la era espacial, solíamos divertirnos con el juego de la gravedad. A la voz de "¡En la Luna!", nos poníamos a imitar las zancadas, lentas y torpes de los astronautas vistas en la televisión. Si la orden era: "¡En Júpiter!", nos arrastrábamos a gatas. Pero a nadie se le ocurría gritar: "¡En un asteroide!" En aquellos días de antes de las películas espaciales, ¿quién iba a saber qué era un "asteroide"? Ahora que soy mayor y me gano la vida estudiándolos, aún no sé qué responder.

Pese a que no hemos visto todavía de cerca ninguno de los mayores, lo más probable es que parezcan copias canijas y zurradas de la Luna. La diferencia estaría en que, al ser menor su gravedad, los astronautas darían allí zancadas más largas, nada más. Pero con diámetros de menos de unas docenas de kilómetros, la gravedad es demasiado débil para conferir a esos planetas menores, así se los llama también, una conformación siquiera sea aproximadamente redonda. Los mundos de menor tamaño presentan formas de todos los gustos: cabezas de lagarto, judías, muelas, cacahuetes y cráneos. Debido a su irregularidad, es frecuente que la atracción de la gravedad no apunte al centro de masas. Cuando a esto se suman las fuerzas centrífugas causadas por la rotación, el resultado parece absurdo. Abajo a lo mejor no sería abajo. Quizá nos cayésemos ladera arriba de una montaña. O saltásemos demasiado alto y no volviésemos a tocar tierra, sino entráramos en una órbita caótica (majestuosamente lenta, eso sí) durante días antes de aterrizar en un lugar impredecible. Si tirásemos una piedra, lo mismo regresaría como un bumerán. Un suave salto vertical podría llevarnos a tocar el suelo cien metros a la izquierda, o incluso modificar la estructura del asteroide bajo nuestros pies. Hasta el visitante más felino y sigiloso levantaría una polvareda y dejaría tras de sí una "atmósfera" de restos en suspensión durante días o semanas.

ERIK ASPHAUG, premio Urey de astronomía e investigador de la Universidad de California en Santa Cruz, recrea simulaciones de colisiones entre asteroides en un supercomputador Cray T3E.

Las misiones espaciales, en concreto la sonda NEAR (de *Near Earth Asteroid Rendezvous*, "Encuentro con asteroides cercanos a la Tierra"), la primera en entrar en órbita alrededor de un planeta menor, están modernizando a pasos agigantados nuestra percepción de estos desconcertantes objetos. Sin embargo, pese a las meticulosas observaciones que se han realizado y a la proximidad de algunos asteroides a la Tierra, sabemos mucho menos acerca de ellos (y de sus primos los cometas) de lo que sabíamos sobre la Luna cuando empezaba la exploración espacial. En los planetas menores actúa un delicado entramado de pequeñas fuerzas, y ninguna puede ignorarse ni simularse fácilmente en los laboratorios terrestres. Por dentro, ¿son sólidos o meros ensamblajes de componentes? ¿De qué minerales constan? ¿Cómo sobreviven a las colisiones con otros cuerpos? ¿Podrían desenvolverse en su extraña superficie un astronauta o una sonda de aterrizaje?

Planetas a medio hacer

Empecé el doctorado durante la Administración Bush, cuando los asteroides eran simples manchas, mil puntos de luz que orbitaban entre Marte y Júpiter. Era conocida la existencia de algunas poblaciones menores no tan lejos de la Tierra, y en el Gran Más Allá estaban además los cometas. A partir de las variaciones periódicas del color y del brillo se dedujo que se trataba de cuerpos irregulares cuya envergadura iba de la de una casa a la de una comarca y que giraban alrededor de sí mismos en unas horas o días. Propiedades más detalladas quedaban para la imaginación científica.

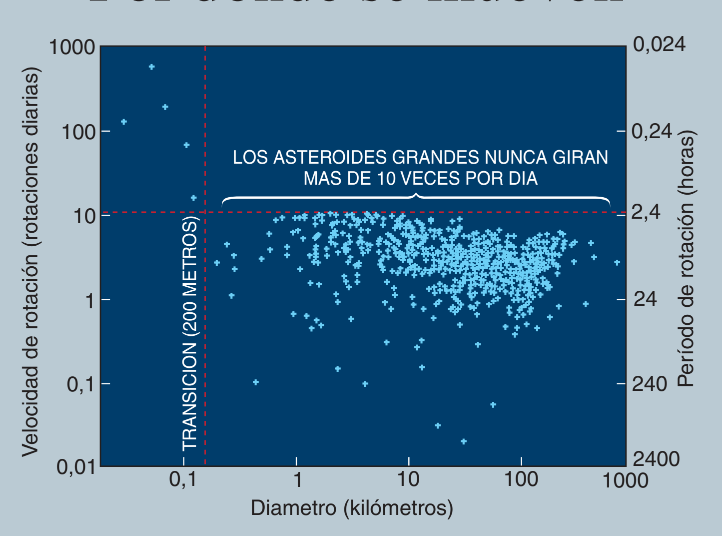
Los asteroides más cercanos a Marte y la Tierra presentan por lo común espectros característicos de una mezcla de minerales rocosos y hierro, mientras que los próximos a Júpiter son en general oscuros y rojizos, señal de una composición primitiva, diferenciada sólo groseramente de la que tuvo la nebulosa primordial donde empezaron a formarse los planetas hace 4560 millones de años. Esa fecha se determina con precisión mediante el análisis de los isótopos del plomo —producidos por la desintegración radiactiva del uranio— que se hallan en

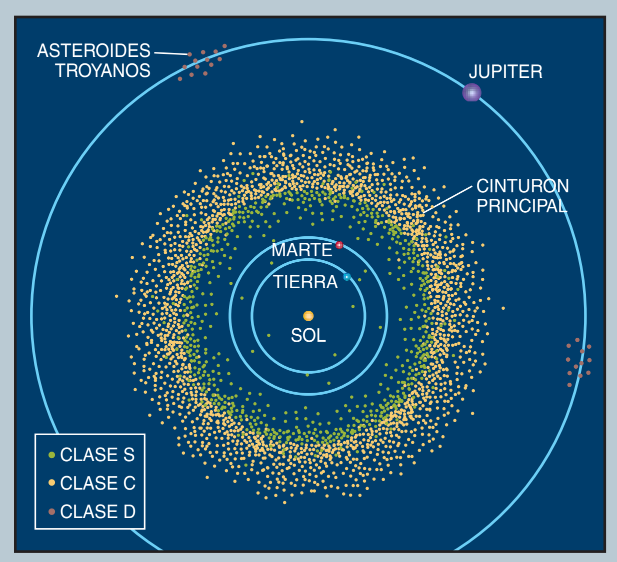


HUELLA GIGANTE DE GARRA es el nombre que recibe un extraño cráter (*en el centro de la imagen inferior*) de Eros, un asteroide de 33 kilómetros de largo, sometido a observación con la sonda NEAR. En la cara opuesta hay una entalladura de reciente formación, con forma de silla de montar (*imagen superior izquierda*), cubierta de marcas inexplicables. Gracias a imágenes como éstas los asteroides van dejando de ser objetos astronómicos —meros puntos de luz— para convertirse en objetos geológicos, mundos enteros cuya exploración no ha hecho más que empezar.

Tipos de asteroides

Por dónde se mueven





DOS GRUPOS DE ASTEROIDES se distinguen al representar sus velocidades de rotación (*eje vertical*) en función del tamaño (*eje horizontal*). No se conoce ningún asteroide de más de 200 metros de diámetro que gire más de una vez cada 2,2 horas. El punto de corte es de fácil explicación si estos asteroides son pilas de cascotes, que se disgregarían si girasen demasiado deprisa. Los asteroides más pequeños, que rotan una vez cada pocos minutos, tienen que ser rocas sólidas. La transición se debe seguramente a las colisiones.

LOS ASTEROIDES DEL CINTURON PRINCIPAL se encuentran entre las órbitas de Marte y Júpiter, pero los más desperdigados cruzan la órbita terrestre (y a veces chocan con la Tierra) o giran sincronizados con Júpiter (en dos grupos conocidos como asteroides troyanos). La parte interior del cinturón principal contiene sobre todo asteroides de roca o roca y hierro (tipo S); hacia su exterior son más oscuros, rojizos y ricos en carbono (clases C y D).

las muestras más antiguas de los meteoritos más primitivos. Hace mucho que se sospecha que los meteoritos proceden de los asteroides. Los espectros de ciertos meteoritos son casi idénticos a los de determinados tipos de asteroides. Tenemos, pues, en nuestro poder fragmentos de asteroide.

Muchos astrónomos pensaban que las observaciones telescópicas, combinadas con el análisis de los meteoritos, podrían suplir la exploración de los asteroides con vehículos espaciales. Aunque los puntos difíciles resultaron ser mucho más duros de lo esperado, se ha avanzado un bosquejo provisional de la historia del sistema solar. Para que los planetas acreciesen a partir de una nebulosa de gas y polvo, tuvo forzosamente que haber una etapa inicial de agregación de los primeros granos minúsculos en cuerpos cada vez mayores, los planetesimales, los bloques con que se construirían los planetas. Sin embargo, las resonancias gravitatorias con el enorme Júpiter, que removían el caldero en la zona que se extiende más allá de Marte, impidieron que los cuerpos superaran los mil kilómetros de diámetro; quedaron restos sueltos que se convertirían en los actuales asteroides.

No obstante, los mayores de estos aspirantes a planeta acumularon cantidad suficiente de calor interno y adquirieron su propia estructura: los metales densos se infiltraron hacia el interior, fueron acumulándose allí y quizá formaron núcleos, dejando tras de sí, en las capas externas, residuos de roca más ligeros. La actividad ígnea produjo metamorfosis adicionales de sus tipos de roca, y en algunos de ellos hubo erupciones volcánicas. Aunque ninguno creció lo bastante como para retener una atmósfera, los minerales hidratados descubiertos en algunos meteoritos revelan que a menudo contenían agua líquida.

Los encuentros de los planetesimales aumentaron su violencia a medida que Júpiter provocaba que la orientación y la elipticidad de sus órbitas se volvieran más aleatorias. Los planetas en ciernes dejaron de crecer; las colisiones entre ellos los cincelaban o hacían saltar en mil pedazos. Los fragmentos siguieron a menudo girando alrededor del Sol en familias con características orbitales comunes y espectros afines. Muchos asteroides y meteoritos representan los restos ricos en roca o metal de esos protoplanetas de estructura diferenciada. Otros asteroides (y la mayoría de los cometas) son cuerpos más primitivos que, por varias razones, nunca se diferenciaron. Son vestigios de una época anterior a la existencia de los planetas.

El cielo se viene abajo

Diez años atrás, no había imágenes de los asteroides con detalles aprovechables. Los astrónomos se resistían a prestarles atención. Los primeros, descubiertos a principios del siglo XIX, recibieron resonantes nombres mitológicos. Pero hallados una decena, una centena y un millar les fueron cayendo los nombres de los descubridores y luego los de sus esposas, benefactores, colegas y perros. En la actualidad, tras un siglo de negligencia, se está generando un interés renovado porque gracias a las nuevas observaciones van dejando de ser débiles centelleos en el cielo y se nos muestran como asombrosas formaciones minerales. Los expertos en asteroides deben agradecérselo al administrador de la NASA, Daniel S. Goldwin, y a los dinosaurios.

El lema de Goldwin —"más rápido, mejor y más barato"— ha sido una bendición para la ciencia de los asteroides, por la sencilla razón de que visitar un vecino minúsculo es más rápido y barato que una misión a un planeta de verdad. El espectro de un apocalipsis ígneo también ha fomentado el interés. El descubrimiento del

cráter Chicxulub en el Yucatán respaldó la idea de que el impacto de un asteroide o cometa hace 65 millones de años borró de la faz de la Tierra bastante más de la mitad de las especies que la habitaban.

Que se repita el fenómeno es sólo cuestión de tiempo; pero, ¿cuánto? Hasta que no se cataloguen todos los asteroides cercanos a la Tierra, y sólo hemos empezado a hacerlo, deberemos contentarnos con analogías sacadas del póquer. (Nunca llegaremos a catalogar los cometas peligrosos, porque cada cometa visita el sistema solar interior sólo en raras ocasiones.) La probabilidad de que suceda una calamidad planetaria en un año determinado es más o menos como la de sacar una escalera de color al as; la probabilidad anual de que el lector de estas líneas muera por otros motivos en un año dado viene a ser la de recibir un trío. Es sumamente improbable que alguno de nosotros muera por el impacto de un asteroide. Sin embargo, hasta a los científicos les atrae la idea de un apocalipsis; con excesiva frecuencia caracterizan a los asteroides por su capacidad explosiva medida en megatones, no por su diámetro.

Acicateados por esta curiosidad inquieta entramos en la edad de oro de la exploración de cometas y asteroides. Se han tomado imágenes de más de una docena. Cada nuevo miembro recibe una acogida calurosa, aunque no exenta de perplejidad. Estos objetos no son lo que esperábamos. Según las predicciones, los asteroides de pequeño tamaño serían compactos y rocosos, y cualquier material superficial suelto (o regolito) que creasen los impactos escaparía de su débil gravedad. Creíase que no existirían cuerpos pequeños compuestos porque el más leve movimiento relativo persistente los disgregaría.

Reducidos a cascotes

Sin embargo, las observaciones y los modelos indican lo contrario. Ahora se sostiene que la mayoría de los asteroides de más de un kilómetro están compuestos de fragmentos menores. A los que se les han tomado imágenes de alta resolución, se les han visto indicios de una cantidad copiosa de regolito, pese a su débil gravedad. La mayoría presenta uno o dos cráteres enormes, algunos más anchos que el radio medio del objeto entero. Semejantes impactos no excavarían un hoyo en un cuerpo monolítico; lo despedaza-

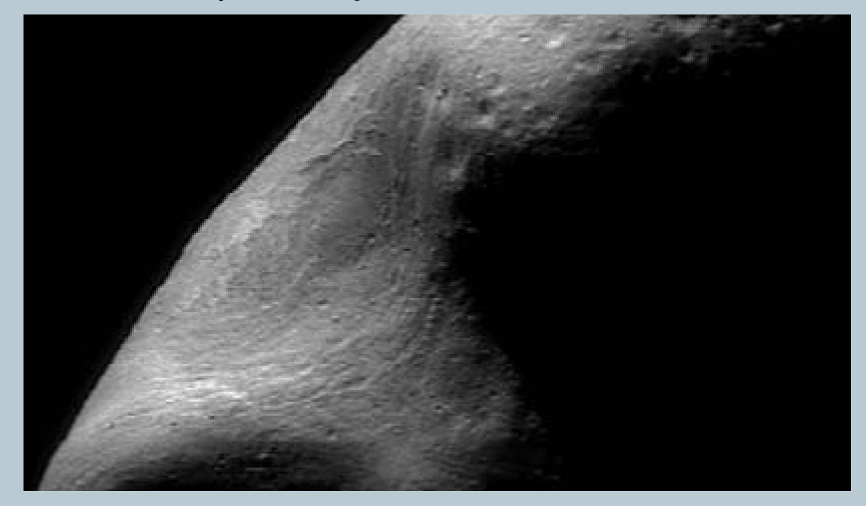
NEAR corteja a Eros

Una roca preciosa

La nave espacial NEAR está ahora en órbita alrededor de Eros, un asteroide que parece un barco de proa estrecha y popa ancha, con un cráter prominente en la cubierta cóncava. La abundancia de restos, en forma de bloques amontonados, alrededor de ese cráter manifiesta la influencia de la gravedad durante su formación. En su interior hay un peñasco que se ha quedado a mitad de camino, como si no supiera dónde está arriba y dónde abajo. A la cara opuesta ha ido a parar otro peñón, tan voluminoso que forma parte del perfil general de Eros. Si lo creó un impacto, como parece probable, Eros debió de quebrarse en ese momento en unas pocas grandes piezas, recubiertas de fragmentos y residuos de menor tamaño.

El nombre "Eros" le queda muy bien, dado su recatado coqueteo con la Tierra. Por desgracia, esta historia de amor podría terminar mal. Paolo Farinella, de la Universidad de Trieste, y Patrick Michel, del Observatorio de Niza, han calculado que Eros tiene un 5 % de probabilidades de chocar con la Tierra en los próximos mil millones de años y el impacto sería mayor que el que produjo la extinción de los dinosaurios.

NI ROCA COMPACTA NI AMASIJO DE POLVO, sino un conglomerado de varias piezas principales, cruzadas por fallas, escarpas y crestas, eso es Eros. La estructura de mayor tamaño es una concavidad suave, con ausencia casi total de cráteres (*abajo*). El cráter más prominente —la "huella de garra", de seis kilómetros de ancho— presenta grandes depósitos en el borde, señal de que la gravedad rigió su formación (*centro izquierda*). Una cresta muy empinada, que corre paralela a las marcas lineales, recuerda la producción de fallas en un material coherente (*centro derecha*). El asteroide rota una vez cada cinco horas y media (*abajo*).









rían. También apoyan la teoría de los fragmentos las mediciones disponibles de las densidades globales. Los valores, demasiado bajos, dan a entender que están atravesados por vacíos de tamaño desconocido.

En resumen, aunque los asteroides que superan el kilómetro de diámetro parezcan peñascos de roca compacta, lo más seguro es que sean ensamblajes de piezas o incluso pilas de cascote suelto, tan fragmentado que no haya roca firme. De esta última posibilidad ya hablaron hace veinte años Don Davis y Clark Chapman, ambos por entonces en el Instituto de Ciencia Planetaria de Tucson, pero no se les pasó por la cabeza que eso pudiera predicarse de asteroides con diámetros tan exiguos.

Poco después de que la nave NEAR pasase hace tres años, de camino a Eros, junto al asteroide Mathilde, Eugene Shoemaker (tras cuya desaparición se ha rebautizado NEAR con su nombre) comprendía que sus enormes cráteres y baja densidad



Visitas a los asteroides

Sinfonía roqueña

CASTALIA

Número oficial de catálogo: 4769
Dimensiones: 1,8 × 0,8 kilómetros
Densidad: 2,1 gramos por centímetro cúbico (superficie)
Tipo de órbita: cruza la órbita terrestre
Clase espectral: S
Rotación: 4 horas

Castalia fue el primer asteroide del que se tomaron imágenes. En agosto de 1989 se aproximó a la Tierra a menos de 11 veces la distancia de ésta a la Luna (demasiado lejos todavía para observarlo con telescopios ópticos, pero al alcance del radar). Steven J. Ostro y su equipo del Laboratorio de Propulsión a Chorro apuntaron a él los potentes y precisos haces del mayor radiotelescopio del mundo (Arecibo). La forma de cacahuete de Castalia sugiere que, pese a una gravedad muy débil, lo componen dos fragmentos de 800 metros de diámetro, en reposo entre sí. Las señales de radar reflejadas en otros asteroides que cruzan la órbita terrestre indican que estas configuraciones binarias de contacto son comunes.

EROS

Número oficial de catálogo: 433
Dimensiones: 33 × 13 × 13 kilómetros
Densidad: 2,7 gramos por centímetro cúbico
Tipo de órbita: cercana a la Tierra
Clase espectral: S
Rotación: 5,27 horas

TOUTATIS

Número oficial de catálogo: 4179
Dimensiones: 4,5 × 2,4 × 1,9 kilómetros
Densidad: 2,1 gramos por centímetro cúbico (superficie)
Tipo de órbita: cruza la órbita terrestre
Clase espectral: S
Rotación: Dos períodos combinados (5,41 y 7,35 días)

Desde las primeras observaciones de Castalia se han presentado oportunidades mejores para estudiar los asteroides por radar; la más notable fue la que brindó el asteroide Toutatis. Con una fuerte influencia de la gravedad terrestre, su órbita es caótica. Se bambolea con dos tipos de movimiento que, al combinarse, crean una rotación no periódica. Un visitante nunca contemplaría el mismo horizonte por segunda vez. El 29 de septiembre de 2004 Toutatis se acercará a la Tierra a menos de 4 veces la distancia entre la Tierra y la Luna y podrá observarse con la ayuda de binoculares.

GASPRA

Número oficial de catálogo: 951 **Dimensiones:** 19 × 12 × 11 kilómetros
Densidad: desconocida **Tipo de órbita:** cinturón principal (familia Flora)
Clase espectral: S
Rotación: 7,04 horas

Gaspra fue el primer asteroide visitado por una nave espacial: Galileo pasó cerca en 1991, de camino a Júpiter. Para algunos, la media docena de concavidades que presenta no son cráteres, sino facetas que se crearon cuando Gaspra se desprendió de su asteroide progenitor. Por otra parte, dada la débil e irregular gravedad de Gaspra, es natural que los mayores cráteres de impacto adopten una configuración plana y asimétrica.

sólo podrían explicarse juntos: un cuerpo poroso, como una pila de cascotes, soporta los impactos mucho mejor que otro compacto. Absorberá y disipará una importante fracción de la energía del choque; la cara opuesta apenas si se enterará. Una buena comparación es una bala disparada contra un saco de tierra, frente a lo propio contra un jarrón de cristal.

¿Y las formas tan irregulares de la mayoría de los asteroides? La intuición nos dice que una topografía tan errática denota solidez. Pero las primeras impresiones resultan engañosas. Cuando se miden las pendientes regionales con relación a esa gravedad como de videojuego, no hay imagen de un asteroide o cometa en que aparezca alguna que sobrepase el ángulo de reposo típico (unos 45 grados), o inclinación a la que los fragmentos sueltos empiezan a caer cuesta abajo. En las regiones más empinadas vemos deslizamientos de residuos. En otras palabras, los ob-

VESTA

Número oficial de catálogo: 4
Dimensiones: 525 kilómetros de diámetro
Densidad: 3,3 gramos por centímetro cúbico
Tipo de órbita: cinturón principal
Clase espectral: V
Rotación: 5,34 horas

Entre los asteroides grandes, sólo Vesta presenta una superficie de roca basáltica generada por antiguos torrentes de lava. En su pasado remoto se diferenciaron dos capas y sufrió muchos de los procesos geológicos que se dieron en los primeros tiempos de Marte y la Tierra. Debieron de existir hace mucho docenas de cuerpos como éste, pero se fragmentaron y crearon familias de asteroides menores. Se piensa que los meteoritos de hierro proceden de los núcleos de esos cuerpos despedazados; los ígneos vendrían de los mantos y cortezas. El telescopio espacial *Hubble* obtuvo en 1996 esta imagen de Vesta, donde se ve un colosal cráter de 430 kilómetros de diámetro que tiene una antigüedad de quizá mil millones de años; puede que los asteroides pequeños de tipo V que observamos hoy día procedan de ese cráter.



Número oficial de catálogo: 253
Dimensiones: 66 × 48 × 46 kilómetros
Densidad: 1,3 gramos por centímetro cúbico
Tipo de órbita: cinturón principal
Clase espectral: C
Rotación: 17,4 días

Yendo NEAR de camino a Eros se produjo el primer encuentro de una nave espacial con un asteroide primitivo de tipo C. Este objeto esferoidal, negrísimo, es el mayor asteroide de los visitados hasta ahora y uno de los que giran más lentamente. Su órbita excéntrica se extiende hasta los confines más remotos del cinturón principal. Mathilde desvió un poco la trayectoria de NEAR; así nos reveló su masa. La densidad correspondiente es menos de la mitad de la de los meteoritos más parecidos, las condritas carbonáceas; por tanto, si Mathilde está compuesto del mismo material, debe tener una estructura muy holgada. Lo mismo puede decirse de Eugenia, otro asteroide de tipo C, estudiado recientemente por medio de un telescopio terrestre dotado de una refinada óptica adaptativa.
Los cráteres gigantes son sorprendentes: algunos tienen un radio superior al radio medio de Mathilde y, sin embargo, están desprovistos de los bordes o depósitos de material expulsado característicos de los cráteres grandes en otros mundos. Así mismo, ninguno de los cráteres ha sido degradado por la creación de cráteres posteriores; ni siquiera podemos saber qué impactos tuvieron lugar primero y cuáles después.

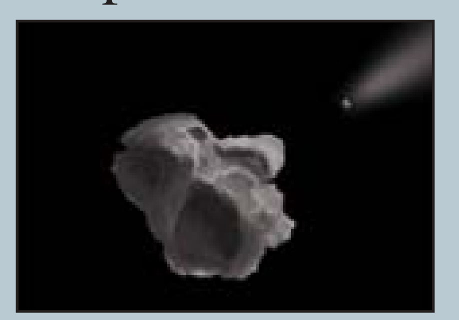


Número oficial de catálogo: 243
Dimensiones: 56 × 24 × 21 kilómetros
Densidad: aproximadamente 2,5 gramos por centímetro cúbico
Tipo de órbita: cinturón principal (familia Koronis)
Clase espectral: S
Rotación: 4,63 horas

Dos años después de visitar Gaspra, la sonda *Galileo* se aproximó a este asteroide del cinturón principal. Una feliz sorpresa fue el descubrimiento de Dactyl, el primer satélite de un asteroide que se haya conocido, de sólo 1,4 kilómetros de diámetro. El equipo de la *Galileo* se sirvió de la órbita de Dactyl para calcular la masa de Ida. La densidad inferida es mucho menor que la del tipo de meteorito con el que ese asteroide guarda mayor relación (una condrita normal), así que, o su composición es diferente, o es poroso. Creen algunos que Dactyl se formó por aglomeración de restos lentos arrojados de uno de los cráteres mayores de Ida, aunque, desde el punto de vista dinámico, es muy difícil que sucediera algo así. Daniel Durda, del Instituto de Investigación del Sudoeste en Boulder, mostró que Dactyl e Ida podrían haberse formado en pareja hace más de mil millones de años, al fragmentarse el progenitor de Ida. Pero es difícil explicar cómo Dactyl habría sobrevivido tanto tiempo sin ser destruido.

¿Sílex o cascote?

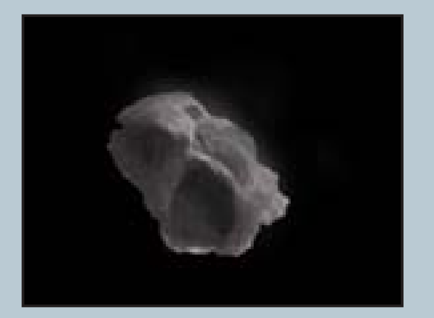
Impactos violentos



ASTEROIDE del tipo de pila de cascotes, cuya estructura fragmentada muestra las cicatrices de las colisiones sufridas. Recibe de nuevo el impacto de un asteroide pequeño y veloz, algo relativamente frecuente.



Sólo salta en el cuerpo agregado la zona que recibió el impacto. En pocos minutos escapan los restos más pequeños y rápidos. Los de mayor tamaño se alejan con parsimonia.



Algunos pedazos grandes escapan; otros regresan. Días más tarde torna la calma. Con el tiempo esa cicatriz estará cubierta de restos expelidos por bombardeos y otros procesos.

jetos pequeños podrían también estar compuestos por rocas o incluso arena, y aun así mantendrían su forma. Al fin y al cabo, las dunas presentan crestas muy definidas y, sin embargo, no puede decirse que sean monolíticas. La rotación rápida contribuiría a dar a una pila de escombros un aspecto alargado y con bultos.

La primera prueba directa que apoyó esta hipótesis de la escollera surgió en 1992, cuando el cometa Shoemaker-Levy 9 se acercó demasiado a Júpiter y se despedazó en dos docenas de fragmentos. Dos años más tarde, ese "rosario de cuentas" se estrelló contra el planeta gigante. Según un modelo que desarrollé con Willy Benz, de la Universidad de Berna, esta fragmentación del cometa sólo pudo ocurrir si constaba de cientos de gránulos sueltos que sufrieron una especie de lento corrimiento de tierras a escala cósmica. A medida que las fuerzas de marea de Júpiter estiraban el cometa, la gravedad formó cúmulos con esos gránulos, algo muy parecido a lo que sucede con el agua que cae en una fuente. Fundados en ese despedazamiento propusimos que los cometas eran una especie de estructuras granulares con una densidad igual a unos dos tercios la del agua helada. Lo que vale para los cometas quizá valga también para los asteroides.

Cuando nada importa, todo importa

La hipótesis de la pila de escombros o cascotes plantea considerables problemas conceptuales. La resistencia material de un asteroide viene a ser nula; por su levedad se está tentado de despreciar también la gravedad. ¿Qué nos queda? La verdad es que no deben ignorarse ni aquélla ni ésta. Por insignificante que pueda ser, la gravedad mantiene unida la escombrera. Todo el que haya hecho castillos de arena sabe que hasta un material tan suelto puede adquirir cohesión. Empiezan a tener significado detalles del movimiento que muchas veces se pasan por alto, como el rozamiento de deslizamiento, los enlaces químicos, el amortiguamiento de la energía cinética o la atracción electrostática. (De hecho, las partículas cargadas procedentes del Sol pueden producir la levitación de polvo de la superficie.) Apenas empezamos a entender la sutil interacción de estas fuerzas minúsculas.

El tamaño de un asteroide debería determinar qué fuerza domina. Una de las indicaciones al respecto es la pauta exhibida por las velocidades de rotación de los asteroides. Algunas colisiones hacen que giren más deprisa y otras más despacio. Si los asteroides fuesen rocas monolíticas expuestas a colisiones aleatorias, un gráfico de sus velocidades de rotación debería mostrar una distribución en forma de campana, con una "cola" estadística donde caerían los que rotasen muy deprisa. Sin embargo, si casi todos los asteroides son montones de cascotes no habrá esa cola; una pila de escombros que girase más de una vez cada dos o tres horas (dependiendo de su densidad global) saltaría en pedazos. Alan Harris, del Laboratorio de Propulsión a Chorro de Pasadena, y Petr Pravec, de la Academia de Ciencias de la República Checa, han descubierto, con sus colaboradores, que, salvo cinco, todos los asteroides observados obedecen un límite de rotación estricto. Las excepciones tienen un diámetro inferior a 150 metros; se observa un corte brusco cuando el diámetro pasa de los 200 metros.

La conclusión evidente —que los asteroides de más de 200 metros de envergadura son estructuras con diversos componentes o pilas de cascotes— concuerda con los recientes modelos informáticos de las colisiones, que también predicen una transición en ese diámetro. Una colisión puede destrozar un asteroide, pero los pedazos se moverán normalmente más despacio que su mutua velocidad de escape (que, dice la regla, es de alrededor de un metro por segundo por kilómetro de radio). Varias horas después, la gravedad habrá reunido todos los fragmentos, excepto los más veloces, en una nueva escombrera. Debido a que las colisiones entre asteroides son bastante frecuentes, la mayoría de los asteroides de grandes dimensiones ya han pasado por esa experiencia. Y recíprocamente, la mayoría de los pequeños deberán ser monolíticos: los fragmentos creados por un impacto escaparán fácilmente de su débil gravedad.

Un asteroide "pequeño", cuyos cráteres de impacto no retienen los residuos que expulsaron, presenta una topografía extremada. Un asteroide "grande" es un ensamblaje de piezas menores al que la gravedad y las colisiones aleatorias pueden redondear o, si gira, dar una forma oblonga.



EL ASTEROIDE SOLIDO, un peñón monolítico, responde a las colisiones de forma muy distinta de como lo hace una pila de cascotes; también un tronco reacciona de forma distinta de un montón de astillas al golpe de un hacha.



La onda de choque se propaga profundamente hacia el interior y resquebraja por completo el cuerpo. Los restos liberados a mayor velocidad desaparecen pronto y los fragmentos mayores bailan despacio al son de la gravedad durante horas.



Muchos de estos fragmentos terminan formando una pila de cascotes. Dada la facilidad con que una roca sólida se convierte en una escombrera, pocos asteroides con diámetros superiores a unos centenares de metros mantienen su solidez.

Sus cráteres tendrán bordes elevados y depósitos de material expelido; veremos la superficie cubierta de regolito. Pero esta distinción por el tamaño no es tan simple. El asteroide Mathilde podría considerarse pequeño, ya que no muestra bordes visibles ni depósitos de materia alrededor de sus enormes cráteres, o bien un cuerpo grande, ya que es más o menos esferoidal. El diminuto Dactyl podría parecer grande, por su morfología esférica y cráteres desarrollados. Esta ambigüedad denuncia la debilidad teórica de la ciencia en que se basan esos criterios.

Valor de choque

Dado que los geofísicos siguen esforzándose en entender cómo se comporta la arena y discurren los corrimientos de tierra en nuestro planeta, hemos de ser humildes cuando nos proponemos comprender la naturaleza de los asteroides constituidos por aglomeración. Dos métodos nos acercan al conocimiento de una de las propiedades clave de estos objetos: su comportamiento en las colisiones.

Derek Richardson y su grupo de la Universidad de Washington simulan los asteroides con pilas de esferas sueltas. Como si fuesen bolas de billar cósmicas sobre una mesa combada (el alabeo representa la gravedad), esas esferas chocan entre sí, rebotan y se frenan por la fricción y otros mecanismos de disipación de energía. Cuando tienen suficiente energía de colisión, se dispersan; más común es que se amontonen de nuevo, algunas o todas. El modelo de Richardson viene bien, sobre todo, para estudiar los suaves encuentros que se producían durante el proceso de agregación en los comienzos del sistema solar, antes de que las velocidades relativas empezaran a acelerarse bajo la influencia gravitatoria del naciente Júpiter. Es sorprendente cuán difícil resulta que los planetesimales sumen masa en las colisiones, incluso en las más débiles.

Los choques a alta velocidad, habituales en los últimos 4000 millones de años, revisten mayor complejidad; hay que tener en cuenta toda una serie de características materiales, como la resistencia, la fractura por fragilidad, los cambios de fase y la generación y propagación de ondas de choque. Benz y el autor desarrollaron nuevas técnicas de cálculo para abordar este caso. En vez de dividir en esferas discretas el asteroide diana del choque, lo tratamos como un objeto continuo, estratificado, agrietado o con redes de vacíos.

En cierta simulación observamos el choque de un cuerpo de 6000 toneladas contra los mil millones de toneladas de Castalia a una velocidad de cinco kilómetros por segundo. Una colisión así libera 17 kilotones de energía, tanto como la explosión de Hiroshima y suficiente para fragmentar Castalia. En la simulación, el asteroide consta de dos partes unidas por la acción de la gravedad. En cuestión de milisegundos se vaporizan el proyectil y una misma cantidad de masa de Castalia, al par que se produce una potente onda de tensión. Como la onda de choque no se puede propagar a través del vacío, rebota en las superficies, incluida la fractura que separa las dos piezas del asteroide. Por eso, la pieza alejada del choque no sufre daños, mientras la cercana se descompone en docenas de pedazos de gran tamaño que tardan horas en dispersarse; de ellos los mayores acaban por unirse de nuevo. Este resultado depende en buena medida de la situación de partida. Otras configuraciones iniciales y parámetros materiales (que, en su mayoría, se desconocen) conducen a resultados muy diferentes. Por ejemplo, es mucho más difícil que revienten los asteroides que al principio sean pilas de cascotes.

Cita con Eros

También podemos proceder hacia atrás, deducir las propiedades de la roca componente del asteroide, partiendo de varias situaciones iniciales distintas y comparando las simulaciones con las observaciones. He trabajado, a este respecto, con Peter Thomas, de la Universidad de Cornell, en recrear el mayor de los cráteres de Mathilde con la más alta precisión posible: su diámetro y relieve (tarea sencilla), que no tenga surcos de fractura o haya dañado a cráteres ya existentes (un poco más difícil) y que no haya depósitos de los materiales expelidos del cráter (muy difícil).

Si admitimos que Mathilde, en sus orígenes, era un asteroide sólido y monolítico, nuestro modelo reproducirá el cráter, pero predecirá además la fragmentación del asteroide en do-

Próximas misiones

Después de NEAR

Antes de que podamos pisar un asteroide habrá que someter a estos pequeños planetas a un minucioso escrutinio, tal y como se exploró cada centímetro de la Luna antes de que el *Apolo 11* se posara en ella. Con esa meta, habrá nuevas misiones que se apoyen en el éxito del proyecto NEAR, aún en marcha.

Dos de ellas recogerán muestras para transportarlas a la Tierra. La nave *Stardust* de la NASA, lanzada en febrero de 1999, se encontrará con el cometa *Wild 2,* y se espera que regrese a la Tierra en el 2006 con una muestra de su cola (algunos granos de precioso polvo). La agencia espacial japonesa ha programado el lanzamiento de la sonda espacial *MUSES-C* en el 2002; recogerá material del asteroide Nereus, sobre el que soltará además un vehículo, construido por la NASA, que recorrerá la superficie a saltos, como una pulga. Aunque tiene ruedas, es imposible saber si tendrá fricción suficiente para rodar.



MINUSCULO TODOTERRENO que brincará sobre la superficie del asteroide Nereus.

Hace poco se ha seleccionado *Contour* (*Comet Nucleus Tour*, "Vuelta alrededor de núcleos de cometas") para que sea lanzado en el 2002. Su objetivo es observar de cerca, en el 2003 y 2006, dos núcleos de cometas y posiblemente otro más en el 2008. Otra sonda cometaria, *Rosetta* (de la Agencia Espacial Europea), emprenderá su camino en el 2003 para encontrarse en el 2011 con el cometa *Wirtanen* (un cometa lejano que se ha desplazado hacia el interior del sistema solar tras un encuentro con Júpiter). De camino visitará además otros dos asteroides. *Rosetta* y su vehículo de aterrizaje observarán cómo *Wirtanen*, en su viaje desde el sistema solar exterior hacia su punto de mayor aproximación al Sol, va dejando de ser un cuerpo helado inerte y termina generando, envuelto en gases, una espectacular erupción.

La primera misión que llevará a cabo un experimento geomecánico en un asteroide será *Deep Impact*. Si todo sale como está previsto, esta nave utilizará un proyectil de cobre de 500 kilogramos de peso para crear un gran cráter en el cometa *Tempel 1*. Su tamaño dependerá de las propiedades del cometa, que esperamos conocer así. Una misión similar, aunque quizá menos llamativa, podría cartografiar sísmicamente el interior de un asteroide disparándole una secuencia de balas "inteligentes" (proyectiles con un escudo protector que llevarían en su interior un acelerómetro y un transmisor de radio). Cada acelerómetro registraría no sólo su desaceleración, que sería brutal a medida que penetrase en la superficie del asteroide e indicaría si había chocado contra polvo fino, gravilla o roca, sino también la señal sísmica procedente de las otras balas que irían golpeando el asteroide en el curso de una de sus rotaciones. En conjunto, esas balas desvelarían la estructura del interior del asteroide de manera análoga a como los geólogos han descubierto la estructura interna de la Tierra estudiando los terremotos. *—E. A.*

cenas de pedazos, y no es eso lo que se observa. Si nuestra suposición de partida es que Mathilde constituía en su inicio una pila de cascotes, como sugería Shoemaker, nuestro modelo del impacto concordará sin dificultad con las observaciones. Kevin Housen, del Laboratorio Boeing de Física de las Colisiones, sostiene también que Mathilde es una suerte de escombrera, pero en su opinión los cráteres son hoyos de compactación —como los hundimientos de un cojín relleno de bolas de poliestireno— y no formaciones excavadas en el terreno.

Para futuras misiones será fundamental conocer la estructura de los asteroides. Una pila de cascotes no responderá del mismo modo que un peñón cuando se intente recoger muestras para transportarlas a la Tierra o, en un futuro más lejano, construir remotos telescopios espaciales, llevar a cabo trabajos de minería o intentar desviar la trayectoria de un asteroide apocalíptico que se dirija contra la Tierra. La irregularidad de la gravedad es también un problema; las órbitas de las naves alrededor de cometas y asteroides pueden ser caóticas, en cuyo caso resultaría harto más difícil evitar una colisión contra la superficie, no digamos ya apuntar cámaras e instrumentos. Por esto lleva NEAR a cabo su investigación a cien kilómetros o más de distancia de Eros. Esta "patata" irregular, de rotación rápida, ejerce a esa distancia casi la misma gravedad que si fuese esférica. La desviación de la nave de una órbita elíptica estándar permitirá a los científicos del proyecto NEAR medir la distribución de densidad de Eros.

NEAR está enviando un torrente de datos a la Tierra mientras gira alrededor de Eros a la velocidad de un ciclista que va de paseo (como corresponde a la baja gravedad). El objetivo principal es esclarecer el vínculo entre asteroides y meteoritos. Las cámaras están cartografiando el cuerpo con una resolución de unos metros, los espectrómetros analizan la composición mineral y un magnetómetro busca su campo magnético y las interacciones con el campo solar. Próximas misiones abordarán asteroides y cometas con superior detalle, pertrechadas de mejor armamentario: se posarán sondas en ellos, se perforará la superficie y se sacarán muestras.

Estos descubrimientos ayudarán a cubrir una gran laguna conceptual en la astronomía. Simplemente, no sabemos cómo son los cuerpos planetarios pequeños, donde la gravedad y su resistencia compiten en condiciones a menudo de igualdad. Los asteroides son un ejercicio de funámbulo: tan serenos como la Luna, son capaces de crear cataclismos; lo bastante grandes como para aguantar los fragmentos que los forman, son demasiado pequeños para perder sus formas exóticas. Ni rocas ni planetas, tienen ellos algo de aquí abajo y algo de allá arriba.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

MINING THE SKY. John Lewis, Addison-Wesley, 1996.

DISRUPTION OF KILOMETRE-SIZED ASTEROIDS BY ENERGETIC COLLISIONS. Erik Asphaug, Steven J. Ostro, R. S. Hudson, D. J. Scheeres y Willy Benz, en *Nature*, vol. 393, págs. 437-440, 4 de junio, 1998.

METEORITES AND THEIR PARENT PLANETS. Segunda edición. Harry McSween, Cambridge University Press, 1999.

ASTEROID FRAGMENTATION AND EVOLUTION OF ASTEROIDS. Eileen Ryan y William Bottke en *Annual Reviews of Earth and Planetary Science*, vol. 28, págs. 367-389. Annual Reviews, 2000.



1. EL INCESANTE AUGE de la población traería gravísimas consecuencias, tales como enfermedades, terribles hambrunas y enormes trastornos sociales: así lo vienen pensando muchos desde los tiempos de Thomas Malthus. Tan pesimista opinión parecían corroborarla estudios sobre roedores. Pero carece de base sólida el pensar que a los humanos nos afecten las cosas de un modo similar. En la mayoría de las situaciones de aglomeración sabemos arreglárnoslas bastante bien.

Problemas de la masificación

Frans B. M. de Waal, Filippo Aureli y Peter G. Judge



En 1962 *Scientific American* publicó el artículo "Densidad de población y patología social", que abriría un nuevo surco en psicología experimental. Aquel trabajo de John B. Calhoun se encabezaba con una alarmante cita de Thomas Malthus, demógrafo inglés de finales del s. XVIII; se decía en ella que al aumento de población humana le siguen automáticamente aumentos del vicio y de la miseria. Calhoun advertía que, si bien es cosa sabida que la superpoblación causa enfermedades y escasez alimentaria, apenas tenemos idea alguna sobre su influjo en el comportamiento.

Esta reflexión le había inspirado para acometer un experimento de pesadilla: introducía en una habitación atestada cada vez más ratas y observó que los apretujados animales no tardaron en competir violentamente por la comida y por aparearse, matándose unos a otros y llegando a la canibalización; gran parte de esa actividad se desarrollaba entre los ocupantes de una sección central del comedero. Pese a haber comida dispersa por otros puntos del recinto, las ratas eran irresistiblemente atraídas por el estímulo social, aunque muchas de ellas no llegaban a alcanzar los pocillos centrales de comida. Esta conjunción patológica, como la calificó Calhoun, lo mismo que el concomitante caos y desvío comportamental, le indujeron a acuñar la expresión "hundimiento de la conducta".

De inmediato, periodistas y ensayistas se lanzaron a comparar las algaradas políticas con invasiones de ratas, la vida masificada en las ciudades con hundimientos de la conducta y las zonas urbanas con grandes zoológicos. Advirtiendo que la sociedad se estaba precipitando hacia la anarquía o hacia la dictadura, Robert Ardrey, un periodista científico, apuntaba en 1970 que las aglomeraciones humanas eran fenómeno voluntario: "Igual que las ratas de Calhoun elegían libremente alimentarse en los comederos centrales, nosotros buscamos libremente la ciudad." Las opiniones de Calhoun se convirtieron en dogma central de la fértil bibliografía sobre la agresividad.

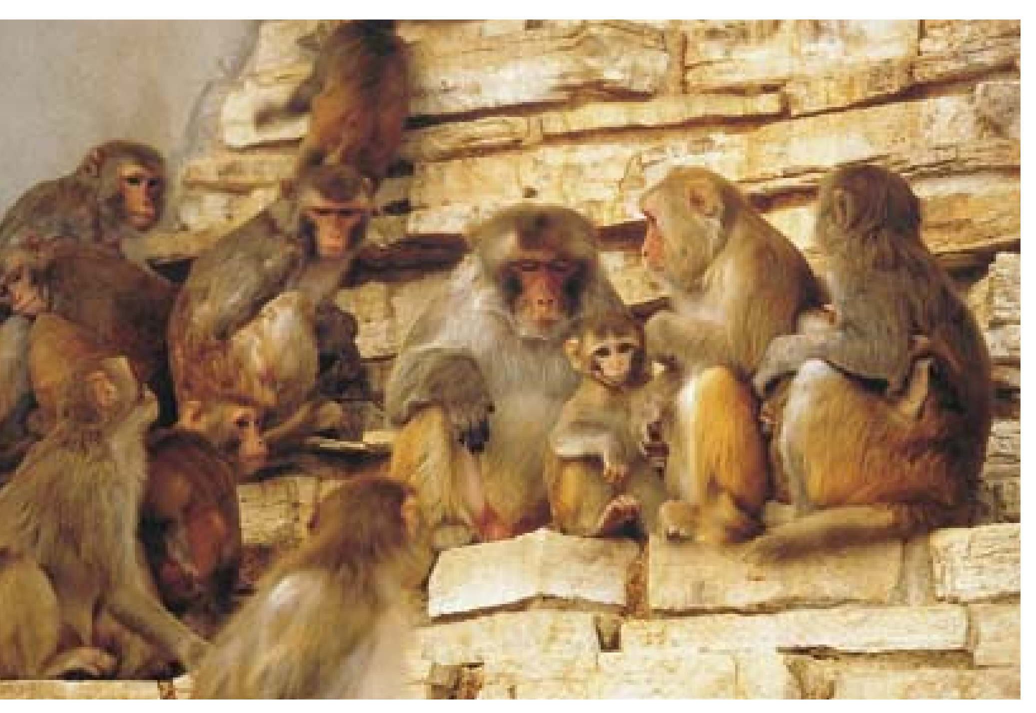
Pero en la extrapolación del roedor al hombre, sus defensores estaban dando un descomunal salto en el vacío. Basta con echar un vistazo a las poblaciones humanas para convencerse de lo frágil de semejante extensión. Compárese, por ejemplo, las tasas de asesinatos per cápita con el número de personas por kilómetro cuadrado en diferentes países, cómputo que hemos hecho nosotros a partir de los datos del *Anuario demográfico 1966* de las Naciones Unidas. Si el paralelo fuese tan claro, ambos variarían a la par. No hay, sin embargo, entre ellos ninguna relación estadísticamente significativa.

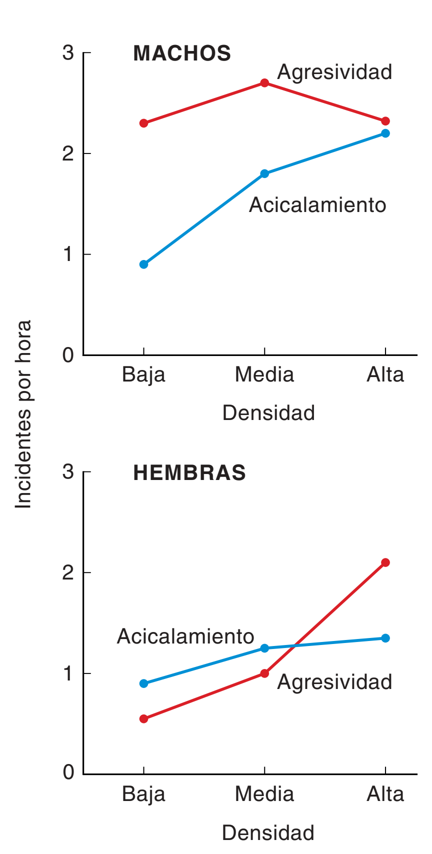
Podría sospecharse que tal vez oscureciesen esa relación las diferencias en renta nacional, organización política u otras variables. Mas no vimos que fuera ése el caso, al menos en lo tocante a la renta. Nosotros dividimos los países en tres categorías —los de libre mercado, los del hasta hace poco Bloque del Este y los del Tercer Mundo— y repetimos nuestro análisis. Esta vez hallamos una correlación significativa, pero fue en la dirección inversa: había más violencia criminal en los países menos densamente poblados del "telón de acero". Dábase una tendencia similar en los países de libre mercado, entre los cuales EE.UU. tenía la mayor tasa de homicidios a pesar de ser en general baja la densidad de su población. En Holanda, con una densidad 13 veces más alta que la norteamericana, la tasa de homicidios era ocho veces menor.

Sabiendo que suelen producirse más acciones criminales en las áreas urbanas que en el campo, calculamos y tuvimos en cuenta para cada país la proporción de habitantes que viven en grandes ciudades; pero esa corrección no nos dio ninguna correlación positiva entre densidad de población y número de homicidios. Quizá se deba al fuerte influjo de la historia y de la cultura el que no se logre distinguir con nitidez el nexo —si es que existe— entre espacio disponible y agresión humana.

Ni siquiera en experimentos humanos a pequeña escala hallamos

Según un mito muy arraigado, la alta densidad de población engendraría violencia. Aunque pudiera ser ello cierto para los roedores, en el ámbito de los primates reina una pauta muy distinta





2. LOS MONOS *RHESUS* de tres lugares diferentes muestran distintas tasas de recíproco acicalamiento, vale decir, de interacción tranquilizadora. Al parecer, para adaptarse a condiciones de apiñamiento en espacios reducidos se asean y acarician unos a otros más frecuentemente. Entre los machos, el mutuo acicalarse y el limpiar a las hembras fueron más comunes cuando vivían apiñados que cuando vivían en espacios amplios. Entre las hembras no emparentadas era común la agresividad y aumentaba con la aglomeración, pero también aumentaba entonces la limpieza mutua, que servía para amortiguar los conflictos.

pruebas de tal vinculación. Comprobamos que a niños y adolescentes el apiñamiento les producía a veces irritación y cierta agresividad, pero solían arreglárselas para evitar el conflicto. Andrew S. Baum y su grupo, del departamento de psiquiatría de la Universidad de las Fuerzas Armadas, observaron que los residentes que habían de compartir con muchos las instalaciones de los dormitorios dedicaban menos tiempo a relacionarse socialmente y procuraban tener cerradas las puertas de sus habitaciones más a menudo que los estudiantes que disponían de más espacio. Baum llegó a la conclusión de que los efectos del apiñamiento no son, ni con mucho, tan agobiantes como en un principio se presumía. Publicados en los años ochenta, este y otros estudios fueron dando al traste, en el mundo académico por lo menos, con la idea de que los humanos y las ratas reaccionen lo mismo al estar apretujados en un espacio escaso. En la sociedad moderna es común el fenómeno de la masificación —ida y vuelta del trabajo, espectáculos deportivos, compras en grandes almacenes, salida de vacaciones, etcétera— y, sin embargo, la gente controla su conducta extraordinariamente bien la mayor parte del tiempo.

Así pues, hay que concluir que el modelo de Calhoun no es aplicable, en general, al comportamiento humano. ¿Se debe esa peculiaridad exclusiva a nuestra cultura e inteligencia? ¿Forma parte de una herencia más antigua la capacidad de controlarnos en medio de la masa? Para responder a estas preguntas, volvamos a los primates.

Los primates no son ratas

En un principio, la investigación sobre los primates pareció corroborar el argumento que se daba respecto a las ratas. Por los años sesenta se informó que, en la India, los monos que vivían en las ciudades eran más agresivos que los de su misma especie que moraban en las selvas. Otros observadores aseguraban que los monos de los parques zoológicos eran más violentos de lo ordinario. Al parecer, aquellos monos sólo se sometían a los que entre ellos eran unos terribles peleones e imponían así una jerarquía social considerada por los científicos como artefacto de la cautividad. Dicho de otro modo, creíase que en la selva prevalecían la paz y el igualitarismo. Alguno, en tono hiperbólico, llegó a describir los efectos del apiñamiento en pequeños grupos de babuinos cautivos como “un motín en el gueto”.

Pero ulteriores investigaciones acumularon pruebas en contra de tales ideas. Si en unos casos la mayor densidad de población parecía incrementar la agresividad, también se daba lo opuesto. Por ejemplo, según cierto informe, en un grupo de macacos aumentó el número de peleas y muertes cuando se los puso en un corral 73 veces *más espacioso* que el de partida. Y se produjo un aumento similar de la agresividad cuando después de estar dos años y medio en el corral se los congregó otra vez en un recinto restringido.

Mientras que el estudio de los macacos manipulaba la densidad demográfica mediante la modificación del entorno, otra de las primeras investigaciones hacía lo propio agregando más individuos a los grupos ya constituidos de monos. Siendo los simios xenófobos por naturaleza, con tales pruebas se medía su hostilidad hacia los extraños, cosa muy distinta del

efecto de la densidad. A medida que las investigaciones ganaban en rigor, menos claro resultaba el cuadro. El aumento de la densidad supuso un aumento de las agresiones en sólo 11 de los 17 estudios mejor planteados de los últimos decenios.

Entre tanto se fue viendo de otra manera a los primates en su medio silvestre. No eran ya aquellas criaturas pacíficas e igualitarias imaginadas. En los años setenta, numerosos trabajos de campo empezaron a describir violencias esporádicas, aunque letales, en una amplia gama de especies —de los macacos a los chimpancés—, así como estrictas y bien definidas jerarquías que permanecían estables durante décadas. Esta visión de una existencia llena a menudo de ansiedad se confirmó cuando los investigadores hallaron altos niveles de cortisol, la hormona del estrés, en la sangre de algunos monos en su medio salvaje.

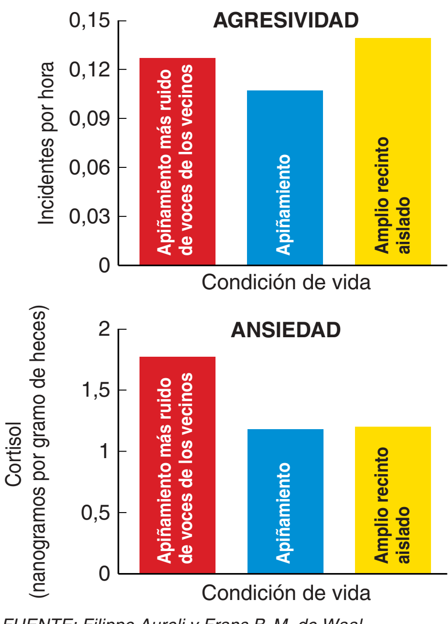
Al hacerse más compleja la percepción de la conducta de los primates y perder crédito, mediante ejemplos en contra, la comparación con las ratas, la ciencia empezó a preguntarse si no habrían desarrollado los primates un medio de contrarrestar el conflicto en las situaciones de apiñamiento multitudinario. Atisbamos el primer indicio de tal posibilidad en un estudio de la mayor colonia zoológica de chimpancés de cuantas hay en el mundo, la de Arnhem en Holanda. Los primates vivían allí durante el verano en un espacioso islote cubierto de bosque, pero al llegar el invierno se los encerraba en un edificio donde había calefacción. Pues bien, a pesar de reducírseles así 20 veces el espacio, la agresividad aumentaba sólo levemente. De hecho, el efecto del estrechamiento espacial no era del todo negativo, ya que también se hacían más frecuentes entre ellos los gestos amistosos y afectivos, los saludos, besuqueos y caricias y las inclinaciones en muestra de sumisión.

Nos preguntamos si este comportamiento conciliador mitigaría la tensión. Ideamos una manera de someter a prueba tal hipótesis. No ignorando que el apretujamiento de muchos individuos en poco espacio aumenta las posibilidades de que entren en conflicto, dimos por descontado que los primates pondrían en juego estrategias contrarrestadoras, entre ellas las de evitar a potenciales agresores y ofrecer apaciguamiento o fomentar los abrazos y otros contactos amistosos. Como probablemente algunas de las habilidades implicadas son adquiridas, las más eficaces respuestas de contrarresto habría que esperarlas de animales que hubiesen vivido apiñados durante largo tiempo. Quizás ellos desarrollaran una “cultura social” diferente, del mismo modo que los humanos, según los lugares en que estén, tienen diferentes patrones de privacidad y distintas zonas de complacencia mutua. Está comprobado que, al conversar, los norteamericanos blancos y los británicos se mantienen a mayor distancia de sus interlocutores que los iberoamericanos y los árabes.



3. EN LA NATURALEZA, LOS CHIMPANCES de un grupo defienden su territorio mostrándose hostiles a los de otros grupos; en cautividad les molesta la presencia de chimpancés vecinos alborotadores. Examinando a los primates en tres situaciones distintas —apiñados unos en un espacio exiguo en el que podían oír a sus vecinos, confinados otros en igual estrechez de espacio pero sin aquella molestia auditiva y viviendo los terceros en un amplio recinto aislado (*fotografía inferior*)— medimos en qué proporción se relacionaban la agresividad, el espacio y el estrés. La agresividad (*foto de la izquierda*) siguió siendo la misma, pero el estrés variaba con el ruido de los vecinos. Los chimpancés encerrados en pequeños espacios desde los que oían las voces de los otros grupos dieron los niveles más altos de cortisol, la hormona del estrés.





FUENTE: Filippo Aureli y Frans B.M. de Waal

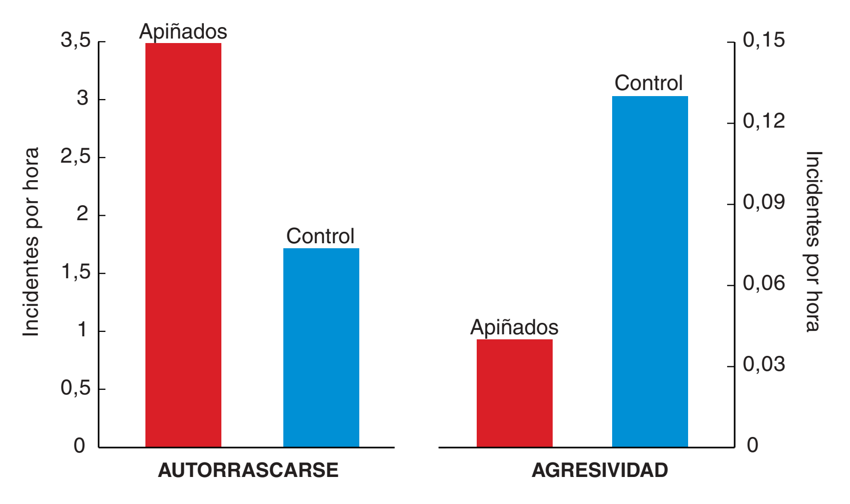
Cultura de refreno

Nos dedicamos a buscar algunos grupos de monos de la misma especie que hubieran vivido en distintas condiciones, para ver si sus comportamientos variaban de manera apreciable. Recogimos numerosos datos sobre 122 individuos de la especie *Macacus rhesus* en tres puntos de EE.UU.: en los corrales, un tanto exiguos, del centro de primates de Madison; en los mucho más amplios del centro de Yerkes, y en la isla Morgan, situada frente a la costa de Carolina del Sur. Los monos de este último lugar tenían unas 2000 veces más espacio por individuo que los de los grupos de mayor apiñamiento. Los de los tres grupos habían vivido juntos durante muchos años, algunos a lo largo de generaciones; en los tres grupos había machos y hembras. Todos ellos habían sido también cuidados por el hombre, recibiendo alimentos y atención veterinaria, lo que los hacía igualmente comparables en este aspecto.

La sociedad de los *rhesus* consta de unos cuantos subgrupos, conocidos como matrilíneas, de hembras emparentadas y sus vástagos. Las hembras permanecen toda la vida juntas, mientras que los machos al llegar a la pubertad abandonan su grupo natal. Los monos *rhesus* distinguen muy bien entre el pariente y el que no lo es: los contactos más amistosos, como los del aseo mutuo, se dan en el seno de las matrilíneas. Las hembras de una misma matrilínea se alían también y se apoyan con ferocidad contra las de otras matrilíneas. Por lo estricto de su jerarquía y lo agresivo de su temperamento, los *rhesus* parecían ser unos sujetos ideales para nuestro estudio. Nos imaginábamos que si este belicoso primate mostrara respuestas contrarrestantes, nuestra hipótesis habría resistido su prueba más rigurosa.

Nuestro primer hallazgo fue, sorprendentemente, que la densidad de población no afectaba a la agresividad de los machos. En condiciones de apiñamiento era incluso mayor la frecuencia de contactos amistosos entre los machos adultos; acicalaban más a las hembras y éstas limpiaban también más a menudo a los machos. (El acicalamiento es una conducta sedante. En otro estudio demostramos que el corazón de un mono late más despacio mientras otro simio le limpia las pulgas y lo asea.) Las hembras enseñaban también más a menudo los dientes a los machos, modo de mostrar su inferior categoría y forma de apaciguar a los machos dominantes potencialmente agresivos.





Fuente: Filippo Aureli y Frans B. M. de Waal

Sin embargo, las hembras se comportaban de una manera diferente con otras hembras. Dentro de sus propias matrilíneas se peleaban más, aunque sin alterar el ya alto nivel de interacción amistosa. En su trato con otras matrilíneas manifestaban también más agresividad, pero al par que ésta aumentaban las atenciones recíprocas y los gestos de sumisión.

Estos hallazgos adquieren sentido a la luz de las diferencias en las relaciones entre parientes y no parientes. Las hembras consanguíneas —como hermanas o madres e hijas— se hallan unidas entre sí por un vínculo tan fuerte, que es improbable que quiebre sus relaciones el antagonismo. Los *rhesus* saben arreglárselas para dominar el conflicto intrafamiliar, que recorre un ciclo de peleas y reconciliaciones seguidas de reconfortantes contactos. El apiñamiento en un espacio reducido no cambia mucho esto, salvo que han de reparar más a menudo los lazos familiares rotos. Entre las matrilíneas, por otra parte, el apiñamiento plantea un grave desafío. El trato amistoso entre las mismas suele ser raro, y común el antagonismo. Pero, al haber menos oportunidades de huida, en un espacio reducido aumenta el riesgo de que los conflictos se intensifiquen. Según nuestros datos, las hembras



4. EL EFECTO DEL ASCENSOR ayuda a explicar cómo reaccionan los chimpancés, y también las personas, en situaciones de apiñamiento. Si éste dura poco, las personas suelen limitar la interacción social, evitando con ello cualquier conflicto (*fotografía de la izquierda*). Los chimpancés se comportan igual, reduciendo sus interacciones agresivas (*fotografía superior y gráfico de la izquierda*). Lo cual no quiere decir que las situaciones de apiñamiento no causen angustia. En tales situaciones los chimpancés tienden a rascarse más a menudo, señal de estrés.

rhesus se esfuerzan todas a una por mejorar esas relaciones potencialmente explosivas.

Emociones contenidas

En un segundo proyecto dirigimos nuestra atención a los chimpancés. Como nuestros más próximos parientes animales que son, los chimpancés se nos asemejan en aspecto, psicología y modos de conocer. Su organización social se acerca también a la humana, con una vinculación al macho bastante desarrollada —lo que es raro en la naturaleza—, intercambios recíprocos y prolongada dependencia materna de las crías. En la naturaleza, los machos son sumamente territoriales, invaden a veces los dominios vecinos y matan a los machos enemigos. En cautividad se previenen y evitan tales enfrentamientos.

Reunimos datos acerca de más de 100 chimpancés repartidos en varios grupos del centro de primates de Yerkes. Aunque algunos grupos sólo tenían una décima parte del espacio que otros, lo exiguo de los alojamientos no influía de forma mensurable en la agresividad. A diferencia de lo que ocurría con los *rhesus*, los chimpancés seguían acicalándose y comportándose pacíficamente sin influirles la situación. Si el apiñamiento les causaba tensiones sociales, parecían controlarlas directamente.

No suele pensarse que los animales dominen sus emociones. Quizá los chimpancés sean diferentes. Estos primates pueden simular, ocultar intenciones hostiles tras un rostro amistoso hasta que su adversario se les pone al alcance. En nuestro estudio, el control emocional se reflejaba en la forma de responder los chimpancés a las voces de los grupos vecinos. Esos ruidos provocan chillidos y un despliegue de actitudes belicosas que, en su medio natural, sirven para impedir la intrusión territorial.

Mas en el confinamiento de un espacio exiguo, las reacciones suscitadas crean alboroto. Comprobamos que la tendencia a reaccionar a las voces de los vecinos era, en los chimpancés más densamente apiñados, tres veces *menor* que la de los chimpancés que disponían de espacios más amplios. Puede que los chimpancés sean lo bastante hábiles para evitar responder a estímulos externos que vayan a inquietarlos. Lo cierto es que, según atestiguan etólogos de campo, cuando los chimpancés machos rondan vigilantes por su territorio procuran no hacer el menor ruido si ha de serles desventajoso que sus vecinos les descubran.

La inhibición de las respuestas espontáneas no deja de tener sus costes. Como es sabido, un estado de tensión persistente puede acabar con el sistema inmunitario y arrastrar graves consecuencias para la salud y la duración de la vida. Para medir el estrés en nuestros chimpancés ideamos dos técnicas inocuas. Consistía una en registrar la tasa de autorrascado. A la manera de los alumnos que se rascan la cabeza cuando se enfrentan al papel del examen, en otros primates el autorrascarse indica también ansiedad. Nuestra segunda técnica fue recoger muestras de heces y analizarlas para ver si conte-

FRANS B. M. DE WAAL, FILIPPO AURELI y PETER G. JUDGE colaboran en el estudio de las relaciones sociales y las estrategias de comportamiento de primates. De Waal trabajó durante muchos años en el parque zoológico de Arnhem, antes de trasladarse a Estados Unidos, donde dirige el departamento de lazos vitales en el Centro regional de investigación sobre primates de Yerkes. Aureli ha sido largos años profesor de biología y geología en la Universidad John Moores de Liverpool. Judge comparte la docencia en la Universidad de Bloomsburg con la investigación en Yerkes.

nían cortisol. Ambas medidas patentizaron que los grupos de chimpancés confinados en espacios exiguos y que oían las voces de los vecinos sufrían más estrés. Por sí solo, el espacio no constituía un factor negativo, pues en ausencia de vecinos ruidosos los chimpancés apiñados en espacios pequeños mostraban el mismo nivel de estrés que los que disponían de espacios más amplios.

Así que, aun cuando a los chimpancés no les aumente la agresividad al estar apiñados, no significa ello que en tal situación se sientan relajados y felices, pues quizá tengan que esforzarse mucho para conservar la paz. Si pudiesen elegir, preferirían más espacio. Cada primavera, cuando los chimpancés del zoológico de Arnhem oyen abrírseles la puerta de su encierro invernal para soltarlos en la isla, llenan el edificio con un coro de entusiásticas voces y se abalanzan en tropel hacia el exterior formando un alegre pandemónium en el que todos, jóvenes y viejos, se abrazan, se besan y se dan con gran excitación recíprocos palmoteos en las espaldas.

El cuadro es aún más complejo si consideramos breves períodos de mucho apiñamiento. Se trata de una experiencia cotidiana en la sociedad humana, ya nos hallemos en un autobús urbano o entre el público de un cine. En situaciones de mucho apiñamiento, a los monos *rhesus* les aumenta levemente la agresividad, por ejemplo en forma de amenazas, pero no llegan a la violencia. Las amenazas sirven para mantener a los demás a distancia, impidiendo el contacto no deseado. Los monos se evitan unos a otros y limitan su intervención en las actividades sociales, como si quedándose quietos evitaran posibles conflictos.

En esta táctica del retraerse, los chimpancés dan un paso más: cuando el apiñamiento no dura mucho se muestran menos agresivos. Lo cual indica un control de las emociones todavía mayor. Su reacción recuerda la de las personas que, al ir apretadas en un ascensor, procuran reducir las recíprocas molestias evitando movimientos bruscos, cruce de miradas y hablar en voz alta. Cabría llamar así ‘efecto ascensor’ al modo que humanos y otros primates tienen de contrarrestar los inconvenientes de un apiñamiento transitorio.

Nuestra investigación nos lleva a concluir que descendemos de un largo linaje de animales sociales capaces de adaptarse a todo tipo de condiciones, incluso a las tan antinaturales como son los amontonamientos de población y las aglomeraciones y los atascos en las calles de nuestras ciudades. Aunque la adaptación no sea sin costes, es preferible a la estremecedora alternativa que se predecía basándose en estudios sobre ratas.

Hemos de añadir, incluso, que hasta puede que a las ratas de Calhoun el hundimiento de la conducta no lo produjera sólo el apiñamiento: al parecer, el competir por la comida ejerce también algún influjo. Esta posibilidad entraña una grave advertencia para nuestra propia especie en un mundo cada vez más poblado. Quienes vaticinan que la superpoblación acabará desmoronando el edificio entero de la sociedad quizás estén pensando en la variable errónea. Tenemos un subestimado talento natural que nos capacita para desenvolvernos en medio de una gran densidad de población, pero si a ésta se une la escasez de recursos las cosas cambian.

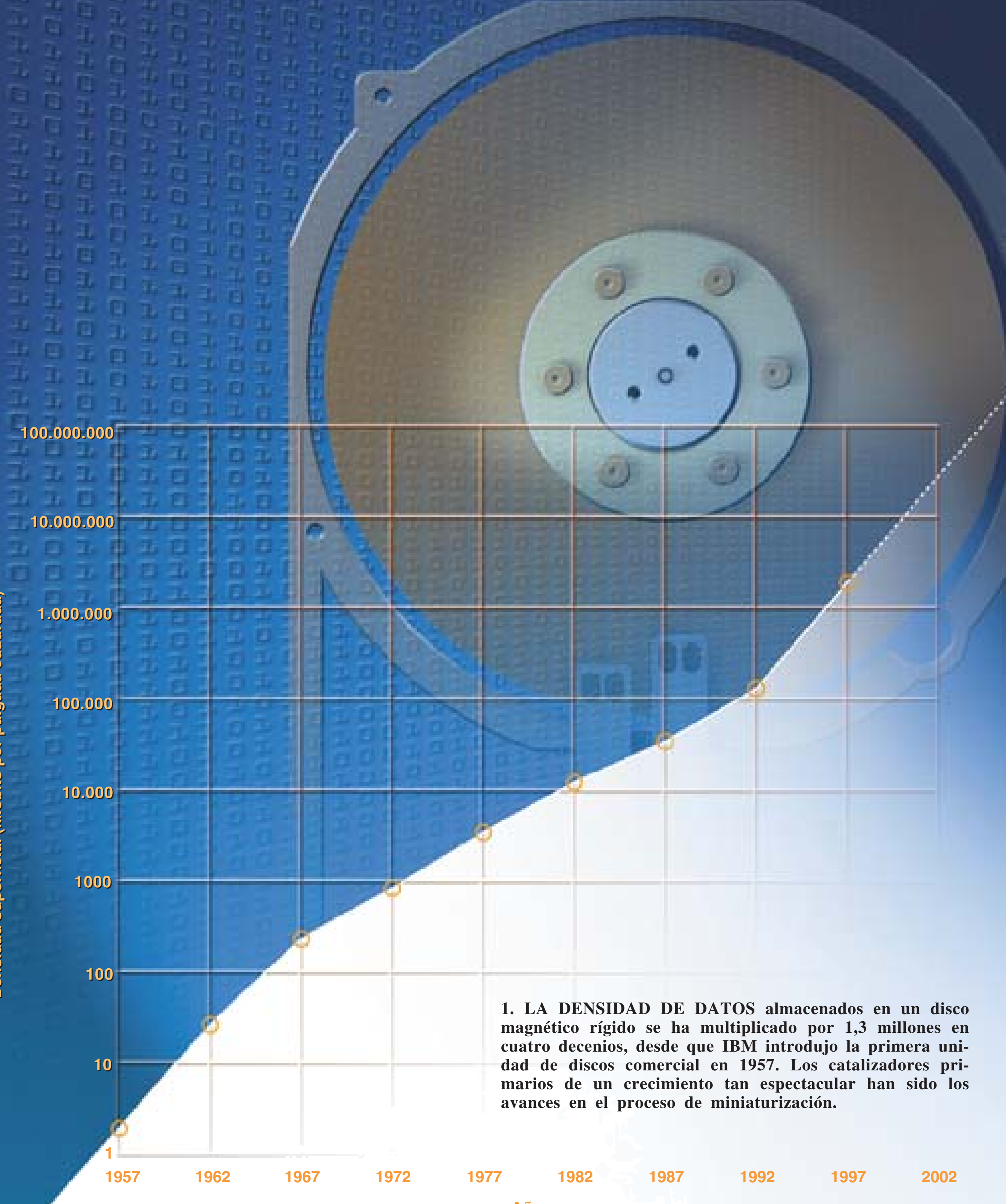
BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE MYTH OF A SIMPLE RELATION BETWEEN SPACE AND AGRESSION IN CAPTIVE PRIMATES. F. B. M. de Waal en el suplemento de *Zoo Biology*, vol. 1, págs. 141-148; 1989.

INHIBITION OF SOCIAL BEHAVIOR IN CHIMPANZEES UNDER HIGH-DENSITY CONDITIONS. F. Aureli y F.B.M. de Waal en *American Journal of Primatology*, vol. 41, n.º 3, págs. 213-228; marzo de 1997.

RHESUS MONKEY BEHAVIOUR UNDER DIVERSE POPULATION DENSITIES: COPING WITH LONG-TERM CROWDING. P. G. Judge y F. B. M. de Waal en *Animal Behaviour*, vol. 54, n.º 3, págs. 643-662; septiembre de 1997.

LA CRISIS DE LAS MEMORIAS MASIVAS



1. LA DENSIDAD DE DATOS almacenados en un disco magnético rígido se ha multiplicado por 1,3 millones en cuatro decenios, desde que IBM introdujo la primera unidad de discos comercial en 1957. Los catalizadores primarios de un crecimiento tan espectacular han sido los avances en el proceso de miniaturización.

La técnica de discos magnéticos se acerca veloz a una barrera física: el efecto superparamagnético. Serán necesarias sagaces innovaciones para poder superarla

Jon William Toigo

Muchas empresas y entidades comprueban que el volumen de datos generados por sus ordenadores se duplica cada año. Las bases de datos colosales, de más de un teraocteto (es decir, 10^{12} octetos), se están convirtiendo de excepción en norma, por la tendencia de las compañías y organismos a mantener en línea una parte creciente de sus registros, que almacenan en discos magnéticos rígidos para una fácil consulta de la información. Los beneficios de tal proceder no son menguados. Las empresas, provistas de la programación idónea para la recuperación y el análisis de datos, pueden identificar rápidamente tendencias del mercado, suministrar mejor servicio a sus clientes, afinar los procesos de manufactura, y así por menudo. Desde la otra orilla, los consumidores están sirviéndose de ordenadores personales de precio modesto para manejar una plétora de datos propios y guardar un sinfín de mensajes electrónicos, hojas de cálculo de la contabilidad doméstica, fotografías digitalizadas y toda clase de juegos de ordenador.

Todo ha sido posible merced a unidades de memoria masiva, a discos magnéticos rígidos de alta capacidad y bajo costo. El perfeccionamiento de esta técnica ha sido legendario: la capacidad de los discos rígidos mantuvo un crecimiento de un 25 a un 30 por ciento anual entre 1980 y 1990, y aceleró hasta un promedio del 60 por ciento anual en el último decenio. A finales de 1999, el incremento anual había alcanzado el 130 por ciento. Hoy, la capacidad de los discos se está duplicando cada 9 meses, con gran ventaja sobre los avances en microcircuitos, que obedecen a la ley de Moore (duplicación cada 18 meses.)

Mientras, el costo de los discos rígidos magnéticos ha caído en picado. Disk/Trend, una compañía de Mountain View, en California, que estudia la evolución de esta industria, informa que el precio medio por megaocteto de los discos rígidos había caído desde 11,54 dólares en 1988 hasta 0,04 dólares en 1998, y estima que el año pasado fue de 0,02 dólares. James N. Porter, presidente de Disk/Trend, pronostica que en el año 2002 el precio habrá bajado hasta 0,003 dólares por megaocteto, es decir, unas 0,50 ptas.

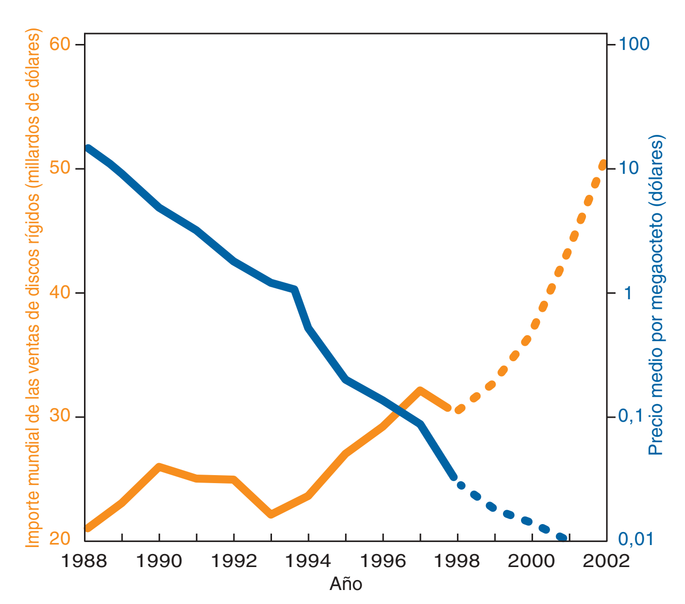
Tan notable combinación de capacidad creciente y precio descendente ha tenido por efecto un próspero mercado. La industria facturó 145 millones de unidades de discos en 1998, y casi 170 millones durante el año pasado. Según las previsiones de Disk/Trend, se espera que tal número se eleve hasta unos 250 millones de unidades en el año 2002, con retornos de unos 50 millardos de dólares.

Ahora bien, resulta muy cuestionable que la industria pueda seguir manteniendo estos fantásticos resultados económicos. En años próximos, la técnica podría alcanzar un límite impuesto por el efecto superparamagnético (ESP). Sucintamente, el ESP consiste en un fenómeno físico que se produce en el almacenamiento de datos cuando la energía necesaria para la conservación del espín magnético de los átomos que constituyen un bit (sea un 0 o un 1) viene a coincidir con la energía térmica ambiental. Cuando así ocurre, los bits pueden experimentar "mutaciones" aleatorias que truecan los 0 y 1, con la degradación consiguiente de la información que representan.

Buscando producir discos rígidos de capacidad cada vez mayor, IBM, Seagate Technology, Quantum Corporation y otros fabricantes no han cesado de embutir bits en regiones de tamaño cada vez menor, con lo que los datos se tornan más sensibles al efecto superparamagnético. Ciertos expertos juzgan que, de continuar al ritmo de miniaturización actual, la industria podría topar con el ESP ya en el 2005. Pero los investigadores se han venido afanando en la elaboración de diversas estrategias para obviar la barrera del ESP. Su ejecución en un mercado caracterizado por una competencia feroz, frecuentes guerras de precios y consumidores muy atentos a sus costos constituirá una hercúlea proeza de ingeniería.

Maravillas magnéticas

Las unidades de discos rígidos, auténticas maravillas de la técnica moderna, constan de varios discos planos, llamados platos, en montaje coaxial. Cada plato está formado por un sustrato de aluminio o vidrio,



2. LAS VENTAS DE DISCOS RIGIDOS se han disparado, mientras que el coste por megaocteto ha caído en picado. Se espera que las ventas alcancen los 50 millardos de dólares en el año 2002.

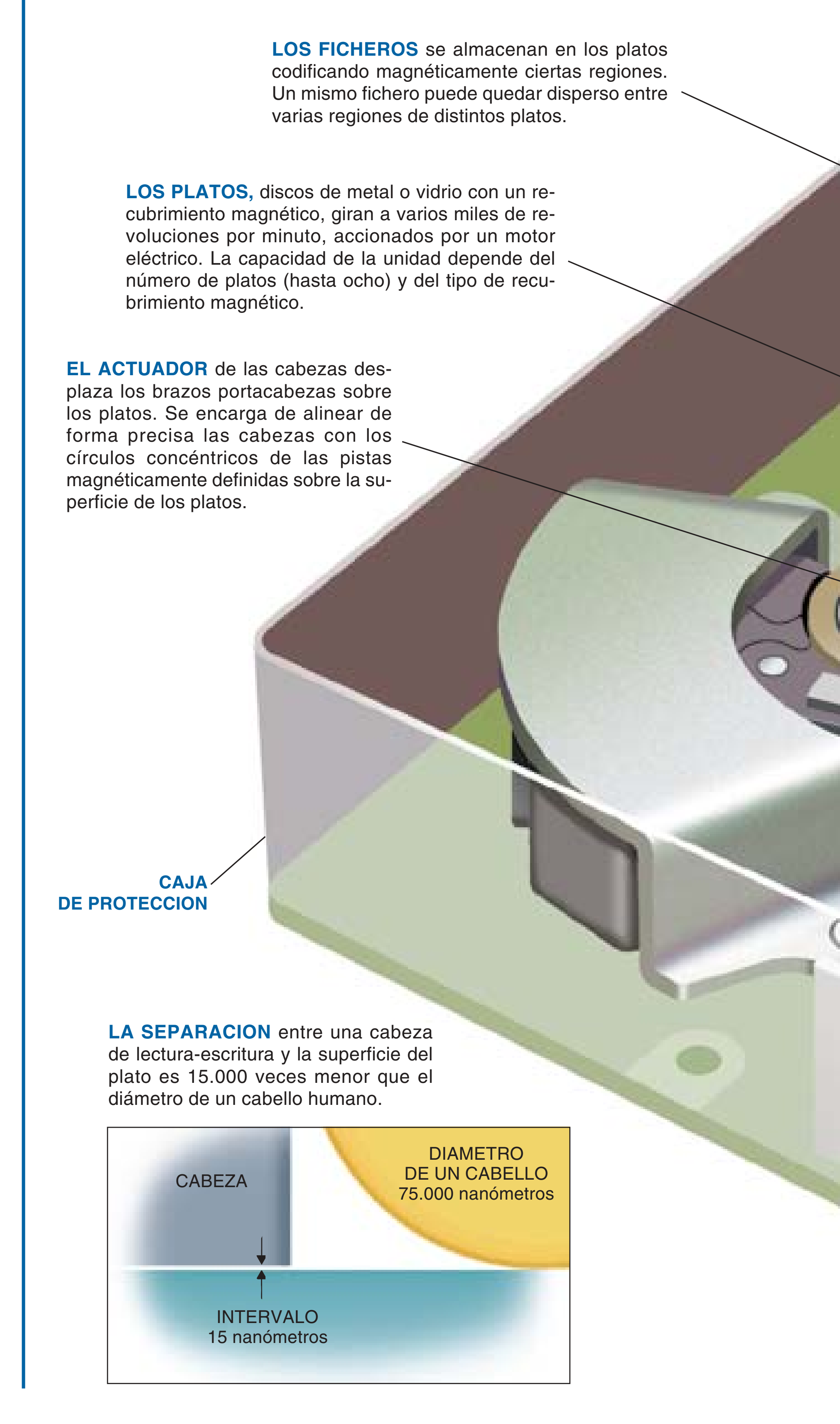
JON WILLIAM TOIGO, autor de libros y artículos sobre materias relacionadas con el almacenaje de la información, dirige un gabinete de asesoría técnica independiente.

recubierto con un material magnético, y capas de protección. Unas cabezas de lectura-escritura, por lo general, una por cara en cada plato, inscriben o recuperan datos, registrados en circunferencias perfectamente definidas sobre el material magnético. Brazos actuadores servomecánicos se encargan de situar las cabezas exactamente sobre las pistas, y un cojinete fluidodinámico de aire hace que las cabezas "sobrevuelen" la superficie a distancias de micras. Un motor hace girar el montaje de platos coaxiales a una velocidad de 3600 a 10.000 revoluciones por minuto.

Los orígenes de este diseño básico se remontan a la primera unidad de discos rígidos, el método de acceso aleatorio de contabilidad y control (RAMAC, de "Random Access Method of Accounting and Control"). Introducida por IBM en 1956, la unidad RAMAC almacenaba datos en 50 platos de aluminio de 24 pulgadas (algo más de 60 cm) de diámetro, recubiertos por ambas caras con una película magnética de óxido de hierro. (El recubrimiento se obtuvo de una imprimación utilizada para pintar el puente Golden Gate de San Francisco.) La RAMAC tenía una capacidad de cinco millones de caracteres, pesaba casi una tonelada y ocupaba más o menos lo que dos refrigeradores modernos.

En los más de cuarenta años transcurridos desde entonces, diversas innovaciones han permitido multiplicar de forma impresionante la capacidad de las unidades y reducir, en modo no menos asombroso, sus dimensiones. En efecto, en ese plazo, la capacidad de los discos ha saltado varios órdenes de magnitud, con el resultado de que algunos ordenadores de sobremesa actuales cuentan con discos capaces para más de 70 gigaoctetos. Tom H. Porter, de Seagate Technology en Minneapolis, explica que la industria ha logrado tales mejoras mediante una miniaturización sistemática. "Cabezas lectoras más pequeñas, platos más delgados, menores distancias de sobrevuelo [la distancia entre la cabeza y el plato]: todo ha consistido en reducción de escala."

ASI FUNCIONAN LOS DISCOS RIGIDOS





LAS CABEZAS de lectura-escritura, situadas en los extremos de los brazos móviles, se desplazan transversalmente sobre las superficies superior e inferior de los discos giratorios. Las cabezas graban los datos en los discos alineando los campos magnéticos de las partículas de la superficie de los discos; leen los datos detectando las polaridades de partículas ya alineadas.

UNA PLACA DE CIRCUITO IMPRESO recibe las órdenes del controlador de la unidad. El controlador está gobernado por el sistema operativo y por el BIOS (sistema básico de entradas y salidas), un conjunto de programas de bajo nivel que vincula al sistema operativo con los elementos materiales. El circuito traduce las órdenes en fluctuaciones de voltaje, que impelen al actuador a desplazar las cabezas sobre las superficies de los discos. El circuito controla también el motor axial que hace girar a los discos a velocidad constante e informa a las cabezas de la unidad cuándo deben leer y cuándo grabar en el disco.

Perfeccionamientos capitales

En el pasado, muchas de las mejoras de capacidad logradas en las unidades de disco resultaron de perfeccionamientos de la cabeza de lectura-escritura, que inscribe datos modificando las polaridades magnéticas de regiones diminutas del medio de almacenamiento, llamadas dominios (cada dominio representa un bit). Para recuperar tal información, se sitúa la cabeza de suerte que los estados magnéticos de los dominios engendren señales eléctricas interpretables como secuencias de unos y ceros.

Las cabezas de los primeros productos eran de ferrita, pero a partir de 1979 la técnica de construcción de microcircuitos permitió la fabricación precisa de cabezas de película delgada. Esta cabeza de nuevo tipo lograba inscribir bits en dominios más ceñidos. A su vez, en los primeros años noventa, las cabezas de película delgada fueron desplazadas por una técnica revolucionaria creada por IBM. Tal innovación, basada en el efecto magnetorresistivo (observado en 1857, por Lord Kelvin), permitió un gran avance en la densidad de almacenamiento.

En vez de leer directamente las variaciones de campo magnético, las cabezas magnetorresistivas buscan minúsculas variaciones de la resistencia eléctrica del elemento de lectura que lo sobrevuela, que está influida por ese campo magnético. Merced a la mayor sensibilidad resultante, pueden reducirse todavía más los dominios de inscripción de datos. Aunque los fabricantes siguieron vendiendo cabezas de película delgada hasta 1996, los sistemas basados en el efecto magnetorresistivo se han ido adueñando del mercado.

En 1997, IBM introdujo otra innovación más: la cabeza magnetorresistiva gigante (CMG), en la cual los materiales magnéticos y no magnéticos de la cabeza de lectura hállanse estratificados, lo que duplica o triplica su sensibilidad. Mediante la estratificación de materiales de distintas propiedades cuántico-mecánicas, a los ingenieros les es posible diseñar lectoras concretas que posean las capacidades CMG deseadas. Currie Munce, del Centro Almaden de Investigación de IBM en San José, afirma que con los desarrollos de esta técnica las unidades de disco alcanzarán densidades de almacenamiento de datos superiores a los 100 gigabits por pulgada cuadrada de superficie de plato (unos 15,5 gigabits por centímetro cuadrado).

Es de señalar que en 1998 expertos hubo que opinaron que el límite para el efecto superparamagnético rondaría en torno a 30 gigabits por pulgada cuadrada. Nadie parece saber de cierto ahora dónde se encuentra la barrera exacta, pero el logro conseguido por IBM ha hecho que se afirme que el "demonio densitario" habita a más de 150 gigaoctetos por pulgada cuadrada.

Sobre la pequeñez de los datos

Pero las innovaciones en las cabezas lectoras carecerían de sentido si los discos individuales que componen la unidad no pudieran almacenar mayor densidad de información. Según Pat McGarrah, de Quantum Corporation en Milpitas, son muchas las compañías que a fin de alojar más datos en un disco están buscando materiales magnéticos que permitan utilizar bits más cortos.

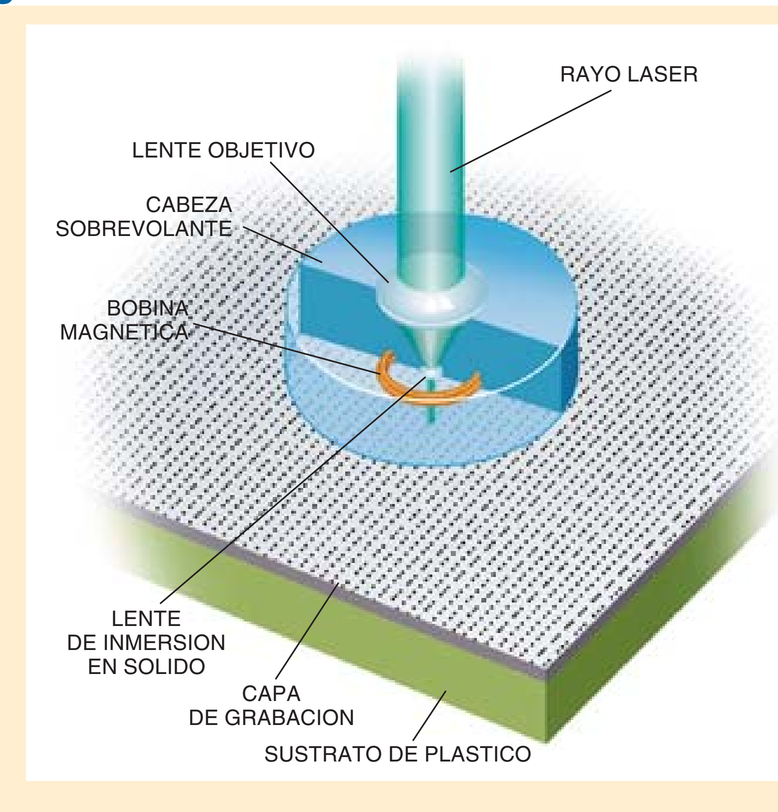
El problema, empero, es el ESP: al reducir el tamaño de los gránulos o cristales del material magnético para crear bits menores, tales gránulos pueden perder la facultad de mantener un campo magnético a una determinada temperatura. "En realidad, todo se reduce a la estabilidad térmica del medio de almacenamiento", explica Munce. "Se pueden lograr unas lectoras más sensibles, pero en última instancia habrá que atender a las propie-

SISTEMAS MAGNETO-OPTICOS

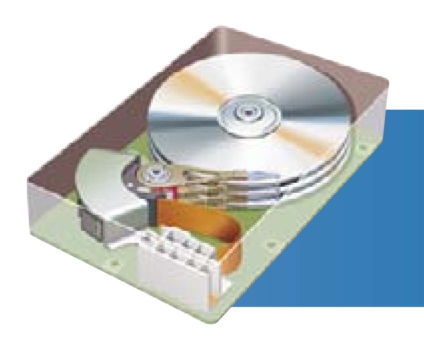
Una estrategia para prolongar la vida útil del percherón que el disco magnético es, podría consistir en suplementarlo con técnica óptica. La metodología híbrida podría llevar a densidades de almacenamiento muy superiores a los actuales 10 a 30 gigabits por pulgada cuadrada (1,5 a 4,5 Gb/cm^2). De hecho, TeraStor, de la californiana San José, afirma que se podrían superar los 30 gigabits por centímetro cuadrado, mucho más que el supuesto límite impuesto por el efecto superparamagnético.

La unidad TeraStor consiste, en esencia, en una variante de la técnica magneto-óptica, en la cual un láser caldea un punto diminuto del disco, para inscribir en él información por vía magnética. Una diferencia crucial, sin embargo, es que TeraStor utiliza una lente de inmersión en sólido (LIS), un tipo especial de lente esférica truncada.

Las lentes LIS, inventadas en la Universidad de Stanford, se basan en la microscopía por inmersión en líquido; en ella, lente y objeto a estudiar se encuentran sumergidos en un líquido, oleoso por lo general, que multiplica la amplificación. Las LIS aplican esa técnica en sentido inverso, con el fin



UN RAYO LASER caldea un punto diminuto del disco; así, la cabeza de grabación puede modificar las propiedades magnéticas del punto y lograr que almacene un 0 o un 1 binario. Con dos lentes se enfoca el haz; lo concentran sobre un punto ínfimo, lo que permite inscribir los bits con una densidad muy elevada. La lente objetivo concentra el haz sobre una lente de inmersión en sólido —piedra angular del sistema— la cual, a su vez, enfoca la luz sobre un punto de diámetro menor que una micra.



El precio medio por megaocteto en los discos rígidos caerá hasta unas 0,50 pta en el año 2002, predice James Porter, de Disk/Trend

dades magnéticas del material (coercitividad o estabilidad magnética) y al número mínimo de gránulos utilizable para obtener una determinada resistencia al borrado térmico.”

Tradicionalmente, explica Munce, se requerían como mínimo entre 500 y 1000 gránulos para almacenar un bit. (Sin embargo, el pasado mes de marzo, IBM anunció un proceso de autoensamblaje en bits de partículas magnéticas que podría proporcionar densidades de almacenamiento superficial de hasta 150 gigaoctetos por pulgada cuadrada.) Los investigadores buscan con empeño materiales perfeccionados capaces de albergar una carga magnética detectable y de resistir con menor número de gránulos al efecto superparamagnético. La industria está desarrollando, asimismo, mejores métodos de manufactura, tendentes a reducir las impurezas en el medio para lograr bits de menor tamaño.

En espera de semejantes avances, el límite de kilobits por pulgada seguirá permaneciendo en la gama de 500.000 y 650.000, según Karl A. Belser, de Seagate Technology. Pero este parámetro, que corresponde a datos almacenados en una pista particular de un plato, constituye sólo uno de los determinantes de la densidad superficial, que es el número de bits por unidad de superficie.

Seguir las pistas

La capacidad de almacenamiento depende también de la anchura de las pistas. Hasta la fecha los fabricantes han podido alojar 20.000 pistas por pulgada, guarismo que se encuentra limitado por diversos factores, verbigracia, la capacidad de la cabeza de grabación para resolver las diferentes pistas y la precisión de su sistema detector de posición. La inserción de mayor número de pistas exigiría avances sustanciales en diversos problemas, entre ellos, en el diseño de la cabeza y del actuador que la controla. Para lograr una densidad global de 100 gigabits por pulgada cuadrada será forzoso que la industria descubra un procedimiento para definir unas 150.000 pistas por pulgada.

Según Belser, con la técnica existente, las pistas han de estar separadas por franjas de 90 a 100 nanómetros de anchura. “La mayoría de las cabezas de escritura se asemejan a una herradura que se extiende a través del ancho de la pista”, explica. “Aunque graban en sentido longitudinal (es decir, a lo largo de la pista circular), generan también campos marginales que se extienden en sentido radial.” De hallarse demasiado juntas, este efecto puede provocar que la información correspondiente a pistas contiguas se superponga y se pierda.

Una solución consiste en fabricar la cabeza de grabación con mayor precisión, haciéndola de menores dimensiones. “Se puede utilizar un haz iónico enfocado para recortar la cabeza de escritura y reducir la anchura de la pista que inscribe”, opina Belser. Pero la cabeza de lectura, que

---

de enfocar un rayo láser sobre un punto de dimensiones inferiores a la micra. La técnica TeraStor es “de campo próximo”, porque la cabeza de lectura-escritura ha de hallarse sumamente cerca del medio de almacenamiento (su separación es menor que la longitud de onda del haz de láser).

El medio de grabación consiste en una capa de material magnético similar al de los sistemas magneto-ópticos. Pero en vez de ser una película magnética embutida en plástico, la capa de grabación descansa sobre un sustrato de plástico, lo que reduce el costo de producción y permite la escritura directa de datos sobre la superficie de grabación.

Lo mismo que en un disco magnético normal, los bits de datos (dominios) se van depositando uno tras otro. Pero en el sistema de campo próximo los bits se inscriben en dirección perpendicular al plano del disco, no horizontalmente sobre su superficie. “Los campos magnéticos de los dominios emanan verticalmente del medio, en lugar de yacer longitudinalmente”, explica Gordon R. Knight, de TeraStor. “Con esta configuración los campos magnéticos de los bits se refuerzan unos a otros, a diferencia de los campos de los bits inscritos en horizontal, y no quedan sujetos al efecto superparamagnético.”

Además, la escritura de estos dominios ultrapequeños procede en secuencias que se traslapan; se crea así una serie de bits en forma de media luna. Este método de grabación duplica el número de bits que pueden escribirse linealmente en una pista; de ese modo, la técnica TeraStor logra una capacidad de almacenamiento más alta. La lectura de la información se funda en el efecto Kerr. Se hace que un rayo de luz sea reflejado por un dominio del disco. Dependiendo de si los cristales del dominio han sido magnetizados para representar un 0 o un 1, la luz resulta polarizada en distintos planos.

La técnica TeraStor se ha venido desarrollando durante más de cinco años. Knight reconoce que la entrega de productos se ha visto pospuesta varias veces, mientras la compañía resuelve diversos problemas técnicos. TeraStor sí exhibió, no obstante, varios prototipos a finales del año pasado en una feria de muestras de la industria; la compañía cuenta ya con diversos socios fabricantes, entre ellos, Maxell y Toso para el medio de almacenamiento, Olympus para los componentes ópticos, Texas Instruments para la microcircuitería ancilar, y con Mitsumi para el ensamblaje de la unidad. Quantum Corporation, uno de los pesos pesados de la industria, con sede en Milpitas, ha invertido en TeraStor y le ha facilitado técnica adicional, amén del acceso a su laboratorio de investigación.

Si todo va bien, TeraStor estará despachando productos muy pronto. Pero las unidades contendrán solamente 20 gigaoctetos de almacenamiento en un medio removible del tamaño de un CD. (Las actuales unidades de discos magnéticos constan ya de más de 70 gigaoctetos.) Knight asegura que los primeros productos podrán sustituir a los productos de almacenamiento en cinta o en soporte óptico en las aplicaciones donde importe la velocidad de acceso, como en la edición digital de vídeo. Y sostiene que esta técnica permitirá unidades de mayor capacidad —más de 300 gigaoctetos— con las que competir con los discos rígidos magnéticos.

—J.W.T.

es un complejo emparedado de elementos, plantea un problema de manufactura más difícil. Además, para prensar 150.000 pistas o más por pulgada, las pistas habrían de tener una anchura inferior a 170 nanómetros. A las cabezas de lectura les resultaría muy difícil seguir unas pistas tan microscópicamente angostas; se precisaría un actuador secundario para conseguir un posicionamiento exacto. (En los productos actuales, un solo actuador gobierna el montaje entero de todas las cabezas.)

Por último, si los bits son más pequeños y las pistas más estrechas, las señales generadas resultarán más débiles. Para separar del ruido de fondo estas señales, habrá que idear nuevos algoritmos capaces de recuperar la información fielmente. Los programas actuales requieren una relación señal/ruido de al menos 20 decibelios. Belse afirma: "A la industria le faltan por lo menos seis decibelios para poder trabajar con la relación señal/ruido que sería necesaria para tratar con los tamaños de bit implícitos en densidades superficiales de 100 a 150 gigabits por pulgada cuadrada."

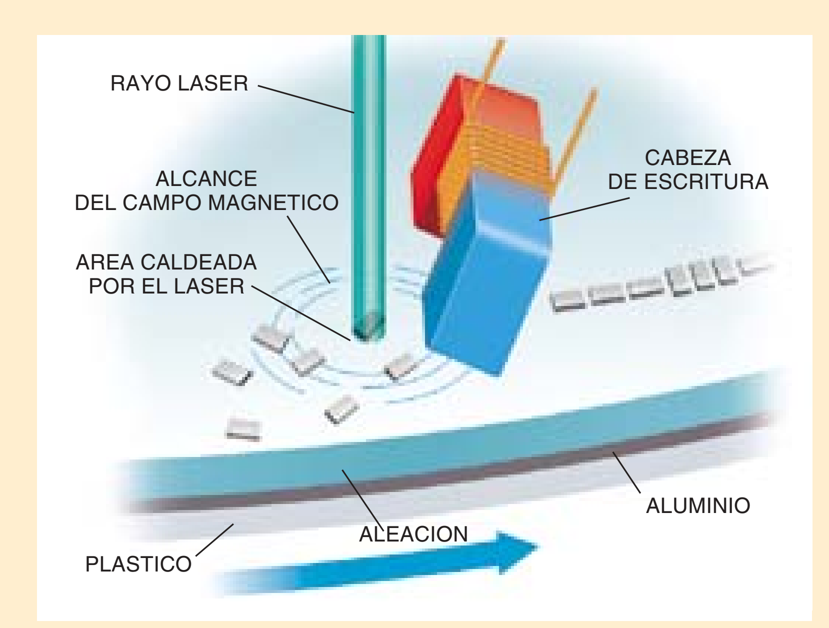
No obstante, muchos expertos de la industria coinciden en que esa clase de problemas se conoce bien. De hecho, Munce afirma que los perfeccionamientos en los materiales, en

MATERIALES "DUROS"

Una forma obvia de embutir más información en un disco consiste en reducir el tamaño de los bits de datos utilizando, para cada bit, menos gránulos o gránulos más pequeños. El problema, sin embargo, reside en la posible interferencia mutua entre los diminutos bits (imaginemos lo que ocurre al aproximar dos barras imantadas). Para impedir tal corrupción de datos, resultado del efecto superparamagnético, se ha venido investigando ciertos elementos del grupo de las "tierras raras" o de los elementos de transición que son, magnéticamente, muy estables. Dichos metales poseen una elevada coercitividad; en la jerga de la industria se denominan "duros".

Como resulta difícil escribir en un material "duro", podemos antes "ablandarlo" por calentamiento con láser. El proceso rebaja la coercitividad de los gránulos, haciendo posible la inscripción de datos en ellos. Cuando el material se enfría vuelve a "endurecerse", protegiendo la información almacenada de las vicisitudes del superparamagnetismo. La idea, que parece bastante sencilla, ha costado llevarla a la práctica: se ha de evitar que el haz de láser caliente por accidente los bits vecinos que contienen datos almacenados con anterioridad.

A tal fin, Seagate Technology emplea un disco provisto de surcos entre las pistas circulares destinadas a bits (al modo de un disco microsurco). Los surcos impiden que el calor del láser fluya hasta las pistas vecinas. Para registrar información en esas estrechas pistas, Seagate ha ideado un nuevo tipo de cabeza de escritura, controlada por un actuador especial. Los detalles de estos componentes todavía no se han dado a conocer.



EN LOS DISCOS MAGNETO-OPTICOS, los cristales magnéticos se calientan con un láser para "aflojarlos" y poderlos reorientar mediante un campo magnético. La miniaturización de esta técnica presenta dificultades; se ha de evitar que el láser caliente por azar datos ya almacenados y los destruya. Para obviarlo, se graban surcos de separación entre las pistas de datos, que evitan los flujos térmicos de unas a otras. Para leer la información, Seagate Technology está considerando la utilización de un sistema de dos capas o pisos, con las pistas de almacenamiento ubicadas en el nivel inferior. Cuando hay que leer los datos, se calienta con un láser una sección de pista del piso bajo. El calentamiento induce un acoplamiento magnético que transfiere los datos al nivel superior del disco, de donde pueden leerse sin interferencias provocadas por las pistas adyacentes.

También la cabeza de lectura presenta ciertas dificultades. Dado que incluso los dispositivos experimentales en servicio tienen una anchura de tres pistas, en lugar de una, cabe la posibilidad de que en el proceso de lectura recojan ruido indeseable, según Karl A. Belser, de Seagate. Y si se lograra una cabeza más estrecha, el dispositivo, para poder seguir las pistas, que son extremadamente finas, tendría que ubicarse con suma precisión. Entre las soluciones se cuenta un sistema de posicionamiento por láser, pero ello añadiría complejidad —y costo— al conjunto de la unidad.

Una alternativa consiste en hacer que el medio sea más fácil de leer, lo que puede lograrse con un medio bicapa, provisto de un estrato de almacenamiento permanente yacente bajo un estrato de lectura. Para leer los datos registrados en el medio, se borraría magnéticamente la capa de lectura; después, la pista apropiada de la capa de almacenamiento se caldearía con un láser para llevar sus datos hasta la capa de lectura mediante un proceso de acoplamiento parecido a los procesos actuales de los discos magneto-ópticos. Una vez inscrita la pista en la capa de lectura, sus bits podrían ser leídos con independencia de las otras pistas. Sin el ruido causado por las pistas adyacentes, hasta una cabeza ancha podría leer la información de la pista de lectura.

De ser viable tal sistema, la técnica permitiría almacenar unos 1000 gigabits por pulgada cuadrada, según Seagate. En contraste, la doctrina vigente sostiene que el efecto superparamagnético limita la densidad de almacenamiento de las unidades de discos tradicionales a un intervalo de 100 a 150 gigabits por pulgada cuadrada. Pero incluso Seagate admite que le harán falta al menos cuatro años para la comercialización de sus unidades de disco térmicamente asistidas.

—J.W.T.

las técnicas de fabricación y en el procesamiento de señal que se están estudiando ya en IBM y en otras empresas permitirán, en pocos años, la manufactura de unidades de disco con densidades superficiales en el intervalo antedicho.

La introducción de las cabezas de película delgada requirió casi 10 años. La transición desde ellas hasta la técnica de magnetorresistencia exigió otros seis años más por diversos imperativos técnicos, entre ellos, la separación de los elementos de lectura y escritura en las cabezas, un proceso de manufactura denominado deposición electrónica y servocontroles de nuevo cuño. “La transición desde las cabezas inductivas de película delgada hasta las magnetorresistivas conllevó cierto número de procesos nuevos”, comenta Munce. “Era forzoso que se produjeran algunos retrasos.”

Pero la transición a las unidades magnetorresistivas gigantes corre mucho más veloz, Sólo requerirá de 12 a 18 meses. La verdad es que IBM y Toshiba habían empezado a expedir tales productos antes incluso de que el resto de la industria hubiera adoptado plenamente las cabezas magnetorresistivas.

La transición ha podido ser tan rápida porque las cabezas magnetorresistivas gigantes no han exigido demasiadas modificaciones en los demás componentes de la unidad. Según Munce, la progresión hacia capacidades de 100 gigabits por pulgada cuadrada se producirá también de forma evolutiva, paulatina, sin saltos revolucionarios.

La cuestión de la velocidad

Ahora bien, la capacidad de almacenamiento no es el único aspecto a considerar. La propia velocidad de acceso a los datos se está convirtiendo en un factor importante que puede también determinar la vida útil de la técnica de discos magnéticos. Aunque la capacidad de los discos magnéticos está disparándose al ritmo del 130 por ciento anual, las velocidades de acceso progresan al 40 por ciento, magro en comparación.

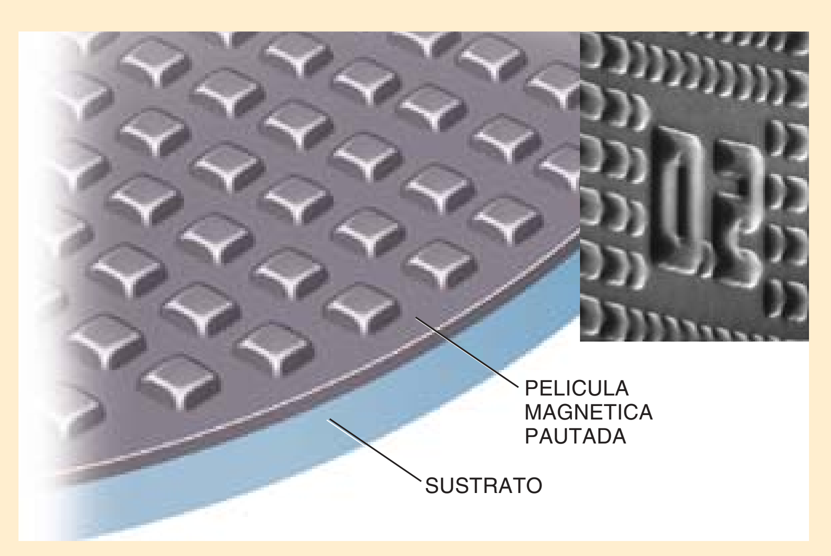
Con el fin de mejorar la situación, los fabricantes han trabajado para aumentar la velocidad angular de los discos. Pero al girar más deprisa, la turbulencia del aire y la vibración pueden provocar errores en el registro de las pistas, problema que podría corregirse con la adición de un actuador secundario para cada ca-

PAUTAS DE BITS

Las unidades de discos magnéticos rígidos pueden almacenar datos a densidades increíbles, muy superiores a los 10 gigabits por pulgada cuadrada de espacio de disco. Pero conforme los fabricantes van apiñando más información, los minúsculos bits empiezan a interferirse unos a otros: es el efecto superparamagnético. Para resolver el problema, se piensa en individualizar los bits erigiendo barreras entre ellos. Tal método, llamado de “medio cuadriculado”, ha sido campo de investigación activa en la mayoría de los laboratorios ocupados en técnicas avanzadas de almacenamiento.

Una forma de introducir cuadrículas en el medio consiste en construir “mesetas” y “valles” sobre la superficie de los platos; en cada meseta se alojaría un bit individual. Según los proponentes de este método, un bit de datos (sea un 0 o un 1) podría en teoría quedar almacenado en un solo gránulo o microcristal de material magnético. La técnica común de discos rígidos requiere un mínimo de 500 a 1000 gránulos por bit. Así pues, con un tamaño de gránulo de siete a ocho nanómetros de diámetro, este tipo de almacenamiento podría lograr densidades de más de 10.000 gigabits (o sea, 10 terabits) por pulgada cuadrada.

Para la construcción de las mesetas y los valles las compañías han estado investigando los procesos fotolitográficos empleados por la industria de microcircuitos. “Harían falta haces de electrones o láseres para grabar



LAS “MESETAS Y VALLES” de un futuro disco magnético podrían contribuir a evitar el efecto superparamagnético, causa de que los bits muy densamente inscritos en el medio magnético se interfieran. Para eludir el problema, se aísla cada bit en su propia meseta. La dificultad reside en lograr que las mesetas sean lo bastante pequeñas: no deberían medir más de 8 nanómetros de lado para lograr los valores de densidad que los diseñadores buscan. IBM ha construido estas estructuras con dimensiones características de 0,1 y 0,2 micras (*inserto*), es decir, de 100 y 200 nanómetros.

la pauta (en el medio de almacenamiento). Después sería necesario desarrollar mesetas sobre una capa de sustrato, de un bit de diámetro”, explica Gordon R. Knight, de TeraStor. Pero hay que depurar más la técnica. Se estima que los procesos litográficos actuales podrían, en circunstancias óptimas, crear mesetas de unos 80 nanómetros de diámetro, que superan en un orden de magnitud lo que se necesita.

Aun cuando la industria pudiera obtener mesetas y valles suficientemente pequeños, seguiríamos precisando una cabeza de lectura de nuevo cuño para leer los datos, explica Currie Munce, de IBM. En su opinión, diversos aspectos de la relación señal/ruido obligarían a soluciones radicalmente distintas de las actuales en los sistemas de discos magnéticos. Por ello, se admite que la técnica de medio pautado tardará años en alcanzar viabilidad práctica.

—J.W.T.

beza. Entre otros perfeccionamientos posibles está la utilización de cojinetes fluidos en el motor, en sustitución de rodamientos de bolas de acero o cerámica, que se desgastan y emiten sonidos audibles cuando los platos giran a más de 10.000 revoluciones por minuto.

Muchos analistas prevén una posible bifurcación en el mercado, en el que ciertos discos estarían optimizados en capacidad y otros en velocidad. Los primeros podrían servir para almacenamiento masivo, por ejemplo, para las copias de seguridad de los archivos históricos de una compañía. Los segundos se destinarían a la atención a clientes y aplicaciones similares, donde la pronta recuperación de los datos es crucial.

En el pasado, los usuarios preferían unidades de la mayor capacidad y menor costo posible, aun cuando el producto operase algo más lento. "En nuestra industria, hipercompetitiva, las unidades con un rendimiento 30 o 40 por ciento superior tienen un precio de venta que es sólo un 20 por ciento más elevado", señala Munce.

Pero hay nuevas aplicaciones que demandan discos más rápidos. Por ejemplo, al extenderse el comercio electrónico por toda la Red, las com-

EN EL HORIZONTE: ALMACENAMIENTO HOLOGRAFICO

El almacenamiento holográfico viene siendo, desde hace casi cuarenta años, la esperanza blanca de la investigación en técnica. A pesar de las enormes inversiones, los investigadores, de instituciones públicas y de la industria, siguen sin lograr un sistema completo de uso general, apto para la comercialización. Continúan, empero, insistiendo sobre esta técnica, por lo asombroso de lo que promete.

Las previsiones teóricas sugieren que acabará siendo posible utilizar técnicas holográficas para almacenar billones de octetos —una cantidad de información equivalente a la contenida en millones de libros— en una pieza de material holográfico del tamaño de un terrón de azúcar o de un disco compacto normal. Además, las técnicas holográficas permiten la recuperación de datos almacenados a velocidades inconcebibles con los métodos magnéticos. En breve, ninguna otra técnica de almacenamiento en desarrollo iguala las posibilidades de la holografía en almacenamiento y velocidad.

Estos hechos han atraído a IBM, Rockwell, Lucent Technologies y Bayer Corporation, entre otros emporios del sector. Trabajando por separado, en unos casos, y, en otros, integrados en un consorcio de investigación organizado y cofinanciado por la agencia estadounidense de proyectos avanzados para la defensa (DARPA), las compañías se están esforzando en producir un sistema práctico de almacenamiento holográfico de uso comercial en el plazo de un decenio.

Desde mediados de los años noventa, DARPA ha contribuido a dos grupos que trabajan en técnicas de memoria holográfica: el consorcio HDSS ("Holographic Data Storage System", sistema holográfico de almacenamiento de datos) y el consorcio PRISM ("PhotoRefractive Information Storage Materials", materiales de almacenamiento de información por métodos fotorrefractivos). Ambos reúnen y coordinan a compañías e investigadores del Instituto de Tecnología de California, la Universidad de Stanford y la Universidad Carnegie-Mellon. Al consorcio HDSS, constituido en 1995, se le encomendó la misión de desarrollar en el plazo de 5 años un sistema práctico de memoria holográfica, mientras que al PRISM, formalizado en 1994, se le asignó la producción de medios de almacenamiento avanzado, para su empleo en memorias holográficas a finales del año en curso.

Próximos a expirar los plazos de ambos proyectos, los participantes han dado a conocer avances recientes de importancia. El año pasado, en Stanford, miembros del consorcio HDSS presentaron una memoria holográfica de la que era posible leer datos a razón de mil millones de bits por segundo. Aproximadamente al mismo tiempo, el HDSS demostraba en la compañía Rockwell, en Thousand Oaks, que un elemento de datos tomado al azar era accesible en 100 microsegundos o menos, cifra que los ingenieros confían reducir a decenas de microsegundos. Esa cifra mejora en varios órdenes de magnitud la velocidad de recuperación de los discos magnéticos, que requieren milisegundos para acceder a un elemento seleccionado al azar entre los datos almacenados. Tan reducido tiempo de acceso es posible porque los haces de láser, esenciales en la técnica holográfica, se desplazan rápidamente sin inercia, a diferencia de los actuadores de una unidad de discos tradicional.

Aunque las exhibiciones de 1999 difirieron considerablemente desde el punto de vista de medios de almacenamiento y técnicas de lectura, bajo los dos sistemas experimentales subyacen determinados aspectos fundamentales. Por ejemplo, se almacenan y recuperan de una sola vez páginas enteras de datos. Estas páginas pueden contener millares e incluso millones de bits.

Cada una de dichas páginas de datos se almacena en forma de figura de interferencia en el seno de un cristal fotosensible o de un material polímero. Las páginas se inscriben en el material, una tras otra, utilizando dos haces laséricos. Uno de ellos, el haz objeto o haz de señal, se carga con la página de datos a almacenar, cuando atraviesa el "modulador espacial de luz", una pantalla especial, similar a las de cristal líquido. La pantalla reproduce la página de datos traduciéndola en una matriz de cuadrados claros u opacos, que recuerda a las casillas de un crucigrama.

Para crear un holograma de esa página se hace que el haz objeto de esa página y un segundo haz, el haz de referencia, se interfieran en el seno del material de registro, que es fotosensible. Según el material, la figura de interferencia queda estampada en el material a resultas de modificaciones físicas o químicas. La figura se registra en todo el material, traducida en variaciones del índice de refracción, de propiedades de absorción de la luz o del espesor del material fotosensible.

Cuando iluminamos esa figura de interferencia almacenada con cualquiera de los dos haces originales, la luz se difracta en él, de modo tal, que resulta reconstruido el otro haz utilizado para producir la configuración. Por eso, al iluminar el material con el haz de referencia queda recreado el haz objeto, que lleva en sí la página de datos. Resulta entonces bastante sencillo detectar la pauta de datos con un sensor semiconductor parecido a los utilizados en las modernas cámaras de vídeo. Los datos tomados del sensor, interpretados, se envían al ordenador en forma de flujo digital.

Se ha logrado situar en un mismo material muchas figuras de interferencia distintas, correspondiente cada una a una página de datos diferente. La separación de las páginas se consigue, ora variando el ángulo entre el objeto y los haces objeto y referencia, ora cambiando la longitud de onda del láser.

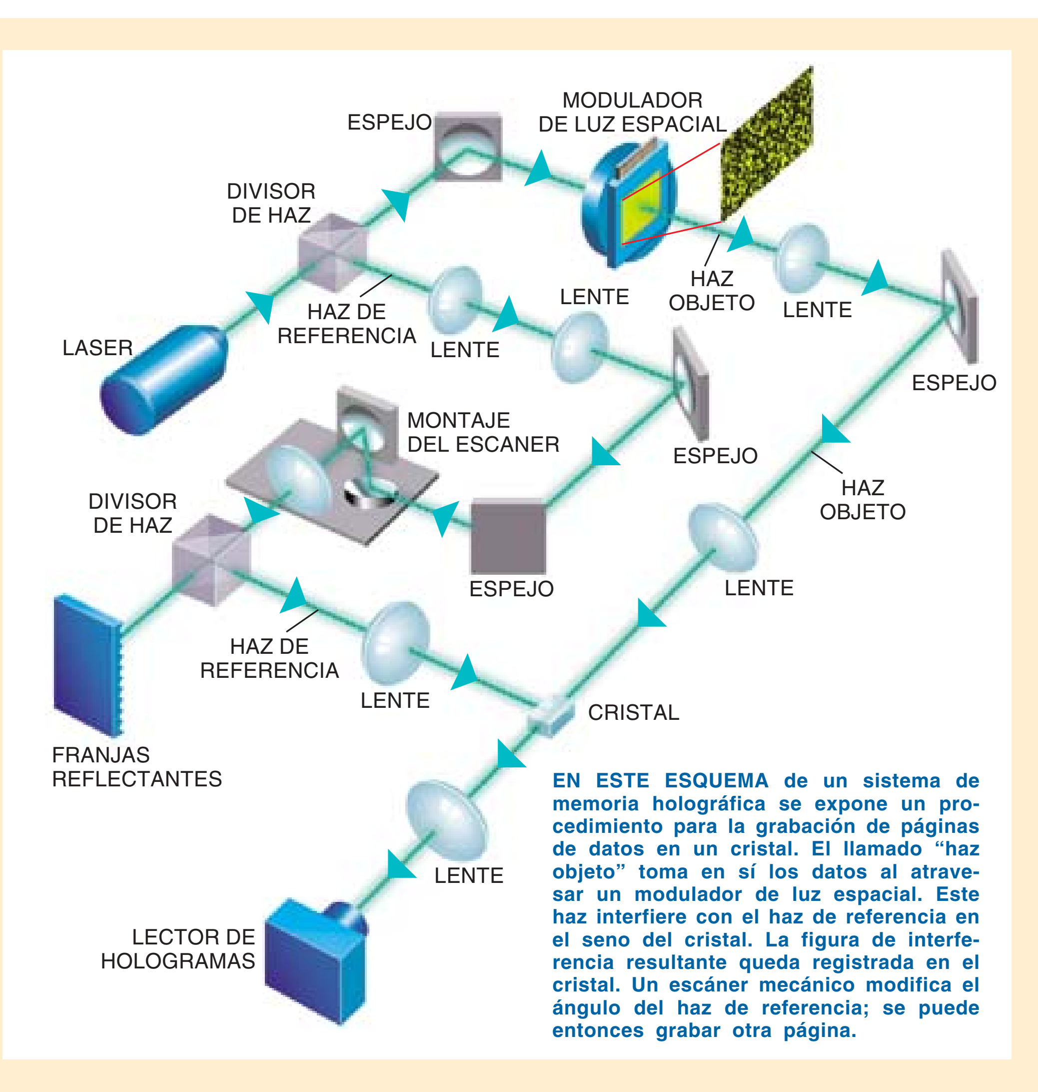
La compañía Rockwell, interesada en el desarrollo de memorias holográficas para aplicaciones aerospaciales y de defensa, optimizó el sistema, en su exhibición, buscando un acceso rápido a los datos, pero no grandes densidades de almacenamiento. Por tal razón, para guiar su láser a través de un cristal de niobato de litio, su sistema utilizaba un solo dispositivo de posicionamiento óptico-acústico, muy rápido. En Stanford, por contra, donde se empleaban técnicas aportadas por IBM, Bayer y otras entidades, el medio consistía en un disco de alta capacidad de material polímero, de tamaño similar a un CD, y estaba concebido para almacenar mayores cantidades de datos. El sistema de Stanford, por otra parte, se proponía utilizar componentes y materiales fáciles de integrar en futuros sistemas comerciales de almacenamiento holográfico.

Según Hans Coufal, que gestiona la participación de IBM en los consorcios HDSS y PRISM, la estrategia de la compañía consiste en recurrir a componentes producidos en masa, siempre que sea posible. Los láseres, señala Coufal, son similares a los utilizados en los reproductores de discos compactos; los moduladores de luz espacial recuerdan a pantallas ordinarias de cristal líquido.

pañías necesitan almacenar y recuperar al instante los datos de los clientes. Además, las empresas están desplegando un número creciente de servidores de archivos "reservados" para aquella información que han de compartir cierto número de empleados, y a la que han de tener acceso rápido.

El debate entre capacidad y rendimiento podría agudizarse mientras la industria considera diversas formas de esquivar la barrera del ESP. Los expertos están de acuerdo en que para superar densidades superficiales de 150 gigabits por pulgada cuadrada, se habrán de tomar nuevos rumbos. Algunas de las opciones exhiben impresionantes capacidades de almacenamiento, pero velocidades mediocres, que limitarían su uso en ciertas aplicaciones. En el presente, entre las principales estrategias se cuentan:

- Cambiar la orientación de los bits en los discos, situándolos en dirección transversal (radial) en vez de longitudinal (perimetral), para apiñarlos más e impedir su inversión aleatoria.
- Utilizar materiales magnéticos que sean más resistentes al ESP, como las aleaciones de hierro y platino, o de cobalto y samario. Si la "dureza" (coercitividad) magnética del material dificulta la inscripción de los datos, se calienta primero el medio, para "ablandarlo" magnéticamente antes de grabar en él.



EN ESTE ESQUEMA de un sistema de memoria holográfica se expone un procedimiento para la grabación de páginas de datos en un cristal. El llamado "haz objeto" toma en sí los datos al atravesar un modulador de luz espacial. Este haz interfiere con el haz de referencia en el seno del cristal. La figura de interferencia resultante queda registrada en el cristal. Un escáner mecánico modifica el ángulo del haz de referencia; se puede entonces grabar otra página.

Pese a lo dicho, queda mucho trecho por recorrer antes de que la memoria holográfica se asome al mercado, señala Coufal. Y explica que, para que el sistema holográfico de almacenamiento y recuperación de la información funcione, la imagen recreada de la página de datos ha de ser prácticamente perfecta. El cumplimiento de las estrictas condiciones de alineación de los láseres, los detectores y los moduladores de luz espacial en un sistema de bajo costo plantea un espinoso problema.

También la determinación del material de almacenamiento idóneo constituye una dificultad persistente, según Currie Munce, de IBM. Esta compañía ha ensayado con múltiples materiales, entre ellos, cubos de niobato de litio y de otras sustancias inorgánicas, así como polímeros fotorrefractivos, fotocrómicos y fotoquímicos, que se están desarrollando en Bayer y en otras instituciones. Aduce Munce que los trabajos realizados por Lucent y por Imation Corporation están logrando también prometedoras expectativas. Empero, ninguno de los materiales que IBM ha ensayado hasta la fecha ha producido la combinación de rendimiento, capacidad y precio adecuadas para un sistema comercial de almacenamiento a gran escala.

Munce y Coufal declaran ambos que el viejo interés de IBM por el almacenamiento holográfico se intensificó en los últimos años, cuando se conocieron mejor las propiedades de recuperación asociativa del medio. Coufal recuerda que en el pasado las aplicaciones del almacenamiento holográfico se orientaban hacia el almacenamiento permanente, en un volumen pequeño, de inmensas bibliotecas de datos de texto, audio y vídeo. A causa del creciente interés comercial de la "minería de datos" —que consiste, en esencia, en el filtrado de almacenes enormes de datos, en busca de relaciones o reglas que permitan refinar la adopción de decisiones o los procesos empresariales en las grandes compañías—, la capacidad de recuperación asociativa de la memoria holográfica ofrece cada vez más atractivo.

Una vez almacenados los datos en un medio holográfico, se puede proyectar una sola página de datos deseados que reconstruirá todos los haces de referencia para datos que tengan configuración similar y estén almacenados en los medios. La intensidad de cada haz de referencia indicaría en qué medida la configuración de datos almacenados concuerda con la página de datos deseada.

"En la actualidad, para buscar datos en un disco se consulta el sector que los contiene, y no el contenido de los datos", destaca Coufal. "Vamos a una dirección, traemos la información y la comparamos con otros patrones. Con el almacenamiento holográfico se podrían comparar datos por medios ópticos sin pasar por recuperarlos. Al buscar en grandes bases de datos, nos veríamos rápidamente encaminados hacia las coincidencias óptimas."

Mientras prosigue la búsqueda del medio de almacenamiento ideal, las aplicaciones prácticas, como la minería de datos, aumentan la apetencia por las memorias holográficas. Aun cuando tuvieran sólo una salida comercial definida, el futuro de los sistemas de almacenamiento holográfico sería, sin duda, brillante.

—J.W.T.

EN DIEZ AÑOS: ALMACENAMIENTO CON RESOLUCION ATOMICA

Chuck Morehouse, de Hewlett-Packard, se apresura a señalar que, probablemente, el almacenamiento de resolución atómica (ARS) no llegará nunca a reemplazar por completo el almacenamiento magnético rotativo. Las unidades de disco existentes y las agrupaciones de discos cumplen bien su papel en equipos de sobremesa y en centros de datos donde el tamaño del dispositivo no importe demasiado. Pero, ¿qué decir de las necesidades de almacenamiento masivo en un reloj de pulsera o en un ingenio espacial, donde el factor de forma, la masa y el consumo energético son criterios prioritarios?

El programa ARS de Hewlett-Packard (HP) aspira a proporcionar un dispositivo del tamaño de la uña con densidades de almacenamiento superiores a un terabit (1000 gigabits) por pulgada cuadrada. La técnica saca partido de los avances en microscopía de sonda atómica, en la que una sonda de ápice o punta monoatómica va explorando la superficie de un material para producir imágenes cuya precisión es de nanómetros. La técnica de almacenamiento por sonda se valdría de una matriz de sondas con ápices sensores de tamaño atómico para leer y escribir datos en ciertos puntos del medio de almacenamiento. Un microdesplazador se encargaría de ubicar el medio con respecto a las puntas.

IBM y otras compañías se afanan en el desarrollo de esta técnica de almacenamiento por sonda. Morehouse informa que el Departamento de Defensa de los EE.UU. también ha apostado por esa opción. La agencia de proyectos avanzados para la defensa (DARPA) financia los gastos de tres investigadores de HP que tratan de llevar al mercado un dispositivo que aún no ha salido del laboratorio.

Según Morehouse, se enfrentan a cuatro problemas principales. El primero es el medio de almacenamiento. El seleccionado por el grupo HP constituye un material bifásico, con dos estados físicos distintos, estables ambos a temperatura ambiente. Una de las fases es amorfa; la otra, cristalina. Los bits se inscriben en este medio fase-alternante calentando zonas puntuales para llevarlas de una fase a otra.

El segundo problema reside en la punta de la sonda. Ha de emitir un haz bien dirigido de electrones al aplicársele una diferencia de potencial. Un haz intenso que fluye desde la punta de la sonda hasta el medio calienta un lugar de datos en la medida necesaria para escribir o borrar un bit. Para leer los datos se puede usar un haz débil, que detecte la resistencia del punto o alguna otra propiedad eléctrica dependiente de la fase. También son posibles técnicas de lectura óptica. HP investiga en una metodología de “campo lejano” donde la punta se encuentre, pongamos por caso, a unos 1000 nanómetros del medio, a diferencia de la mayoría de las tentativas realizadas con sondas, en las que la punta se encuentra en contacto, o casi, con el medio.

La tercera cuestión concierne al actuador o microdesplazador que ha de situar el medio para las operaciones de lectura y escritura. HP está desarrollando un micromotor cuya precisión de posicionamiento es del orden de nanómetros.

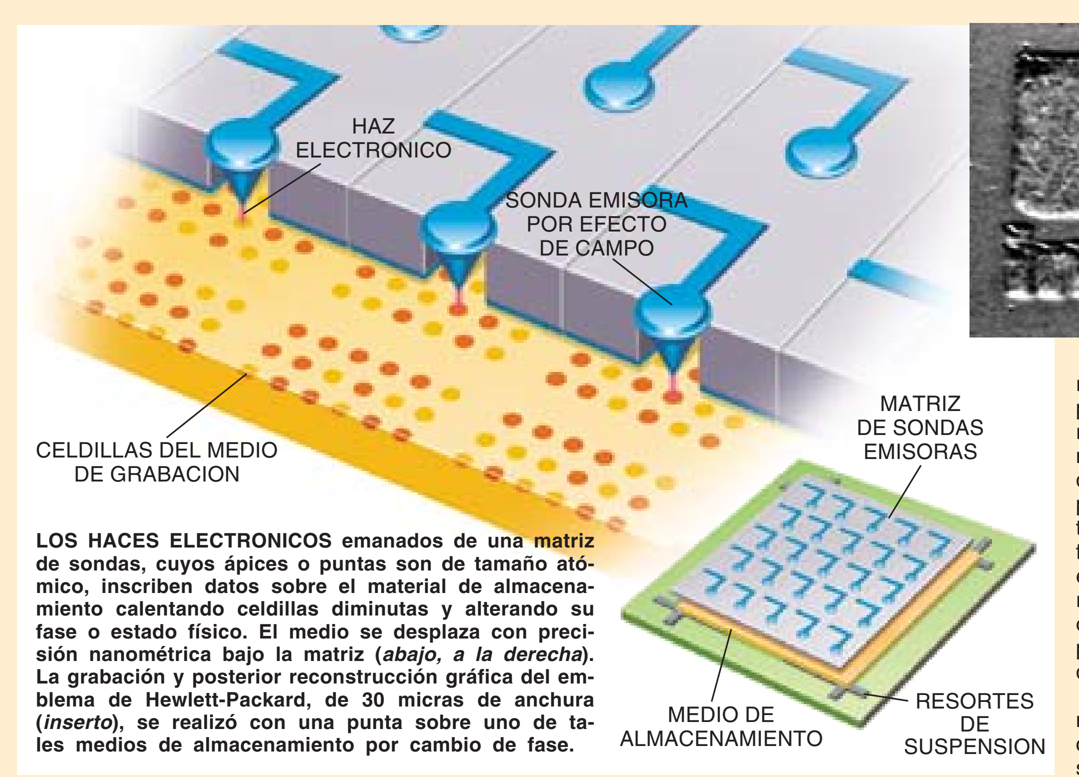
El último paso es el empaquetamiento. En palabras de Morehouse: “Necesitamos ensamblar todo el sistema ARS en un continente robusto y desarrollar para el sistema la electrónica que permita integrarlo con otros dispositivos.” Por otra parte, es muy probable que los elementos funcionales del dispositivo deban hallarse en el vacío o al menos en una atmósfera controlada, para reducir la dispersión de electrones desde el haz de lectura-escritura y para reducir el flujo calórico entre puntos de datos, lo cual plantea una dificultad adicional.

Morehouse estima que la técnica necesaria para crear el dispositivo ARS se hallará madura de aquí a diez años, pero reconoce que llevar el dispositivo al mercado puede requerir considerablemente más. Aunque la industria de discos magnéticos tiene importantes inversiones que proteger, confía en que conforme las aplicaciones vayan exigiendo la portabilidad y el rendimiento que el ARS ofrece, irá adquiriendo un papel señalado en el mercado de almacenamiento.

El tamaño de los discos magnéticos se está reduciendo cada vez más; véase si no el ejemplo del Microdrive de IBM (340 megabytes con un factor de forma de una pulgada). Aun así, “el ARS puede resultar competitivo en muchas aplicaciones”, apunta. “Una ventaja clave se encierra en su reducido consumo de energía. El ARS no consume energía si no efectúa operación alguna. Quizá los fabricantes de relojes no deseen un Microdrive y un montón de pilas.”

Morehouse afirma que los primeros dispositivos ARS podrían tener una capacidad de un gigaocteto, si bien estas capacidades aumentarán con el tiempo: “La capacidad definitiva quedará determinada por lo diminuto que pueda llegar a ser un punto. Nadie sabe la respuesta. ¿Cien átomos, tal vez?”

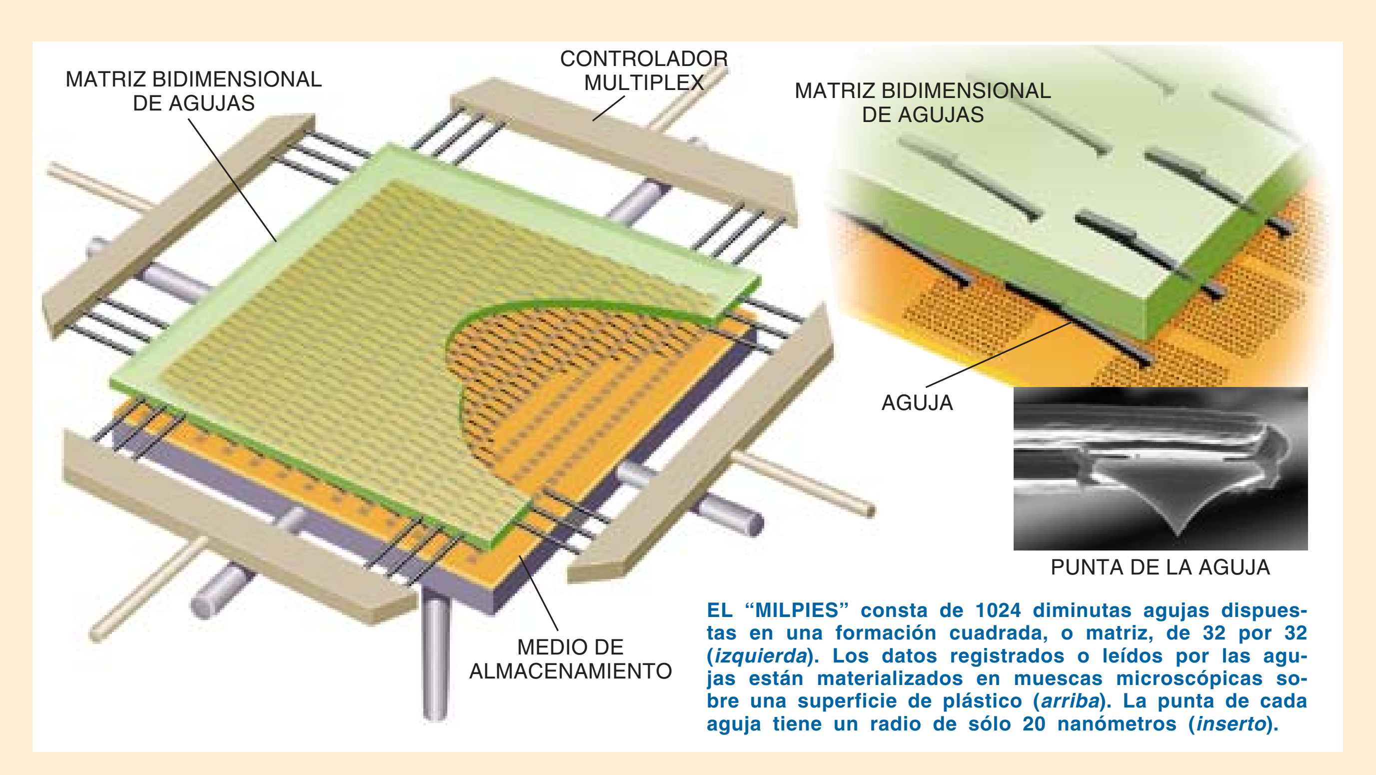
—J.W.T.



LOS HACES ELECTRONICOS emanados de una matriz de sondas, cuyos ápices o puntas son de tamaño atómico, inscriben datos sobre el material de almacenamiento calentando celdillas diminutas y alterando su fase o estado físico. El medio se desplaza con precisión nanométrica bajo la matriz (*abajo, a la derecha*). La grabación y posterior reconstrucción gráfica del emblema de Hewlett-Packard, de 30 micras de anchura (*inserto*), se realizó con una punta sobre uno de tales medios de almacenamiento por cambio de fase.

LAS "TARJETAS PERFORADAS" DEL FUTURO

Hace decenios, las tarjetas perforadas constituían un método difundido, aunque torpón, de almacenamiento de información. Su simplicidad mecánica, contraída ahora hasta dimensiones mínimas, vuelve a estar en boga en IBM. Su grupo de investigación en Zurich ha desarrollado recientemente un prototipo, bautizado Milpiés, capaz de embutir una pasmosa cantidad de información en un espacio diminuto —500 gigabits por pulgada cuadrada— almacenando los datos en forma de microscópicas muescas marcadas sobre una superficie plana de polímero. En comparación, incluso en los prototipos más avanzados de laboratorio los discos magnéticos están hoy limitados a no más de 35 gigabits por pulgada cuadrada. "Hemos reinventado las tarjetas perforadas utilizando plásticos", se jacta Peter Vettiger, director del proyecto.



EL "MILPIES" consta de 1024 diminutas agujas dispuestas en una formación cuadrada, o matriz, de 32 por 32 (*izquierda*). Los datos registrados o leídos por las agujas están materializados en muescas microscópicas sobre una superficie de plástico (*arriba*). La punta de cada aguja tiene un radio de sólo 20 nanómetros (*inserto*).

Para comprender el funcionamiento del Milpiés, recordemos otra técnica ya pasada: la aguja fonográfica. En la versión de IBM, la punta de la aguja es acutísima (su radio es de sólo 20 nanómetros) y descansa suavemente sobre una superficie móvil de plástico liso. Para crear una muesca o pozo, se hace pasar brevísimamente una corriente eléctrica a través de la aguja, lo que calienta su ápice hasta 400 ºC por un instante, que funde ligeramente el polímero. Una serie de tales descargas eléctricas produce así una ristra de muescas, pasando a ser las zonas hundidas y las lisas los unos y los ceros del mundo digital.

Para leer esa información, se calienta la punta de la aguja a una temperatura constante de 350 ºC (inferior al punto de fusión del plástico), al tiempo que se desplaza sobre la superficie del polímero. Cuando la aguja cae en un pozo, se disipa el calor de la punta. El correspondiente descenso térmico se detecta a través de un cambio en la resistencia eléctrica de la aguja.

IBM ha convertido esa técnica básica, derivada de la microscopía de fuerza atómica, en un prototipo operativo. Para aumentar las velocidades de lectura y escritura de los datos, el dispositivo consta de 1024 agujas (de aquí el nombre de Milpiés) en un área de sólo 3 por 3 milímetros. Las agujas, dispuestas en formación cuadrada de 32 por 32, son de silicio y operan simultáneamente, grabando sus muescas sobre una fina película de plástico que recubre un sustrato de silicio.

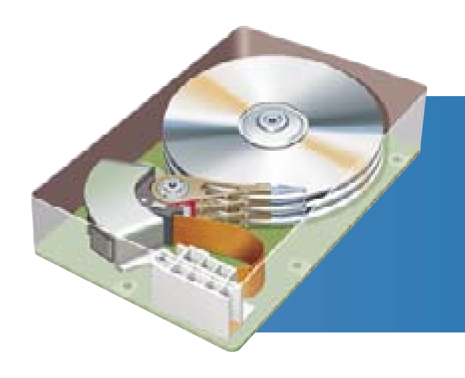
Una de las ventajas del Milpiés estriba en su pequeño coste previsto. IBM afirma que estas matrices pueden construirse baratas mediante procesos similares a los de fabricación de microcircuitos. "Se podrían construir centenares de matrices en una sola oblea", predice Vettiger.

Para mayor almacenaje, un perfeccionamiento futuro podría consistir en una formación mayor (en una materialización anterior, Milpiés disponía de sólo 25 agujas dispuestas en formación de 5 por 5), de matrices múltiples, o en una combinación de ambos. Cabría también pensar en utilizar nanotúbulos de carbono para las puntas de las agujas, que serían aún más pequeñas.

Empero, IBM ha de resolver varios problemas cruciales antes de que el Milpiés se convierta en producto acabado. Le ocupa ahora la estabilidad a largo plazo de la técnica. Las puntas de las agujas podrían embotarse por desgaste mecánico, lo que provocaría que las muescas del plástico se agrandasen. Éstas, con el tiempo, podrían comenzar a traslaparse, convirtiéndose en un embrollo digital los datos prístinos.

Obviamente, es mucho el trabajo por hacer antes de que el Milpiés pueda siquiera tener la esperanza de suplantar a las venerables unidades de discos magnéticos. Tal vez disponga de mayores oportunidades en pequeños artefactos de consumo. IBM confía desarrollar un dispositivo diminuto (de 10 por 10 por 5 milímetros, o menor), capaz de almacenar 10 gigabits; de lograrlo, la técnica sería idónea para teléfonos móviles, cámaras digitales y, posiblemente, para relojes. "Ahí es donde vamos a concentrar nuestros esfuerzos durante uno o dos años", afirma Vettiger. Pero él mismo es el primero en atemperar su creciente apasionamiento. "Se trata todavía de un proyecto de investigación exploratorio", admite. "No es como si estos productos fueran a estar mañana en el mercado."

—Alden M. Hayashi, redactor



Las nuevas técnicas habrán de ofrecer beneficios rápidos y poder competir económicamente con los discos rígidos, advierte Currie Munce, del Centro Almaden de Investigación de IBM en San José

- Estampar litográficamente pautas en el medio de almacenamiento, para alzar barreras microscópicas entre bits.
- Recurrir a materiales de almacenamiento radicalmente diferentes, como cristales holográficos, metales con cambio de fase o plásticos.

Varios son los métodos que han atraído grandes inversiones de los principales fabricantes, pero casi todos ellos se encuentran todavía en las primeras fases de los ensayos preliminares. Algunas de estas ideas han de aguardar a que se produzcan avances significativos en la investigación o progresos esenciales en las técnicas de apoyo, antes de que se pueda empezar a trabajar en serio en prototipos.

Darse un respiro

Hasta ese momento, los fabricantes de discos rígidos continuarán estrujando la técnica magnética habitual para lograr ulteriores perfeccionamientos. "Esta industria parece estar siguiendo una curva logística", observa Porter, de Seagate. Porter explica que, a corto plazo, los fabricantes seguirán a lomos de la ola de avances conseguidos en los campos de la fotolitografía y de la fabricación de microcircuitos, que hicieron posible la producción económica de cabezas magnetorresistivas o de las magnetorresistivas gigantes. En razón de ello, el costo por bit de almacenamiento ha estado cayendo al ritmo de 1,5 por ciento a la semana.

Pero existe el convencimiento general de que la industria tendrá grandes dificultades para seguir a este paso más allá de un par de años. Idos serán los días en que las capacidades de almacenamiento crecían al 130 por ciento anual. "Habida cuenta de los problemas técnicos, es probable que retornemos a tasas de crecimiento del 60 por ciento en el plazo de cinco años", opina Munce. Y Porter añade: "Las cosas se están poniendo más difíciles a un paso más rápido de lo que históricamente solían. Si aflojáramos la marcha, tal vez tuviéramos tiempo para evaluar las opciones."

Nadie sabe cuál de las alternativas llegará a dar fruto. La propia IBM está diversificando sus apuestas, invirtiendo en varios métodos, entre ellos, el de medios configurados, medios plásticos y medios holográficos. Una cosa es cierta: con el ESP en el horizonte, y confrontada la industria con los problemas de diseño estructural y las cuestiones sobre materiales, podría estarse abriendo para ellas una ventana a la oportunidad.

Pero colarse por esa ventana no será fácil. "Las nuevas técnicas tendrán que ofrecer rápidamente rendimientos económicos y poder competir con los discos magnéticos en coste por gigaocteto de almacenamiento", juzga Munce. Lo más probable, prosigue, es que las nuevas técnicas deban empezar por excavar su nicho en el mercado. (Los cristales holográficos, por ejemplo, podrían servir para el almacenamiento permanente de grandes bibliotecas.) "La tendencia es, decididamente, hacia la reducción del coste, lo que hará muy difícil que otras técnicas lleguen a entrar en pista."

En su mayoría, los observadores están de acuerdo en que, con independencia de las incertidumbres de las futuras técnicas de almacenamiento de datos, el efecto superparamagnético no será causa de que la Era de la Información sufra un chirriante frenazo. Si en el viaje de los productos de alta capacidad hasta el mercado se producen demoras, lo más probable es que el vacío lo ocupen de un modo transitorio agregaciones de muchas unidades de discos en formaciones inteligentes, que ante los sistemas y los usuarios finales se representan a sí mismas como unidades individuales "virtuales" de discos magnéticos. Se trata de una opción empleada ya en el caso de los RAID ("agrupaciones redundantes de discos baratos") y en los JBOD ("un puro montón de discos"), agrupaciones que se lanzaron en los años ochenta y noventa para subvenir a las exigencias de almacenamiento de compañías cuyas necesidades no quedaban cubiertas por las unidades de aquel entonces.

Otro método que ha merecido cierta atención en la industria consiste en emplazar unidades y agrupaciones de discos en redes de almacenamiento local (RAL) cuya dimensión se puede modificar dinámicamente para satisfacer crecientes apetitos de almacenamiento. El método RAL "virtualiza" todavía más el almacenamiento y acabará proporcionando una "utilidad de almacenamiento" que entregará automáticamente a las aplicaciones de los usuarios el tamaño y clase de almacenamiento que precisan, tomándolo de una "flota" de dispositivos de almacenamiento interconectados.

Tales métodos de aumento de la capacidad de almacenamiento entrañan una mayor complejidad y, por extensión, mayores gastos de gestión, en comparación con los dispositivos individuales de almacenamiento. A pesar de ello, proporcionan una forma de atender a las necesidades de empresas y consumidores que precisen mayor espacio para sus datos a corto plazo, hasta que las nuevas técnicas arriben al mercado. Se verán, además, facilitadas por la bajada de los precios de las unidades de disco, resultantes de los perfeccionamientos de los procesos de manufactura en curso.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

MAGNETO-RESISTIVE HEADS: FUNDAMENTALS AND APPLICATIONS. Electromagnetism Series. John C. Mallinson, con notas y comentarios de Isaak D. Mayergoyz. Academic Press, 1995.

MAGNETIC DISK DRIVE TECHNOLOGY: HEADS, MEDIA, CHANNEL, INTERFACES, AND INTEGRATION. Kanu G. Ashar. IEEE Press, 1997.

MAGNETIC INFORMATION STORAGE TECHNOLOGY. Electromagnetism Series. Shan X. Wang y A. M. Taratorin. Academic Press, 1999.

MAGNETIC RECORDING. THE FIRST 100 YEARS. Compilación de Eric D. Daniel, C. Denis Mee y Mark H. Clark. IEEE Press, 1999.

HOLOGRAPHIC DATA STORAGE. Compilación de Hans J. Coufal y Demetri Saltis. Springer-Verlag TELOS, 2000.

Carol Ezzell

GÜNTER BLOBEL: El biólogo y la catedral

¿Quién quiere donar un millón de dólares? Este premio Nobel de 1999, para reconstruir una de las obras maestras del barroco alemán

Nueva York. Una de las experiencias decisivas en la vida de Günter Blobel fue descubrir la *Frauenkirche* —la iglesia de Nuestra Señora— de Dresde cuando era niño. Corría el 9 de febrero de 1945, y Blobel, que contaba ocho años, huía con su familia buscando un refugio ante el diluvio de bombas aliadas que caían sobre la Alemania nazi. Al pasar por Dresde, Blobel quedó deslumbrado por la belleza de la cúpula de la iglesia protestante (la "campana de piedra" que durante más de 200 años descolló sobre el resto de la ciudad).

Pero no le duró mucho el gozo de la visión del templo dedicado a la Virgen. Cuatro días después, Blobel y su familia contemplaban con horror desde las colinas cercanas el ataque incesante de artillería aliada sobre la ciudad. Provocó un devastador incendio que convirtió en pavesas los tesoros barrocos de Dresde y segó decenas de miles de vidas. El resplandor de la conflagración iluminaba el paisaje en varios kilómetros a la redonda. "Con la luz que daba podía leerse el periódico", recuerda. Dos días estuvo ardiendo la *Frauenkirche*, hasta que la exquisita estructura cedió y sus sillares se derrumbaron.

Blobel, sus padres y sus siete hermanos y hermanas escaparon de ese azote apocalíptico, aunque una de sus hermanas, de 19 años, murió pocos meses más tarde en el bombardeo de un tren. Su muerte y el recuerdo de la primorosa *Frauenkirche* y su destrucción le han acompañado toda la vida.

De modo que cuando el pasado mes de octubre ganó el premio Nobel de fisiología y medicina por su trabajo sobre la manera en la que las proteínas se abren camino a través de los laberintos de membranas dentro de las células, pensó cómo podrían ayudar los 960.000 dólares anejos al premio a la reconstrucción de la *Frauenkirche*. Resolvió donar el dinero del premio en su integridad a los Amigos de Dresde, una organización que él fundó en 1995 para ayudar al proyecto internacional de reconstruir la iglesia.

Como biólogo, Blobel ha dedicado su carrera a estudiar otras estructuras. Las células de las que se componen hombres, animales y plantas, son catedrales en miniatura, con arcos y contrafuertes de membranas que les sirven de sostén y forman los orgánulos, especializados en el desempeño de diversas funciones vitales.

A la hora de entrar en la universidad, Blobel no optó por una carrera de investigador. Se matriculó en medicina, que estudió en Tubinga. La terapéutica constituía, por lo demás, una profesión de familia. Su padre era veterinario y se ocupaba del ganado en las fincas señoriales cercanas a la mansión familiar de Silesia, antigua provincia alemana que está hoy integrada en Polonia. Veterinarios se hicieron también dos de sus hermanos; otro es médico.

Blobel acababa de terminar la residencia en diversos hospitales alemanes en 1962 cuando decidió cambiar y pasarse a la investigación. "En mi temporada de residente, observé que muchas enfermedades se trataban en razón de los síntomas", se justifica. "Y yo quería tratar la causa."

Decidido a encerrarse en el laboratorio, buscó cómo prepararse debidamente en los Estados Unidos, para luego volver. "Me sentía muy europeo", añade. Pero sus primeros esfuerzos resultaron baldíos. Solicitó una beca Fullbright, que le fue denegada. Por fortuna, uno de sus hermanos explicaba medicina veterinaria en la Universidad de Wisconsin en Madison. Con su ayuda, entró en el programa doctoral de oncología que allí se impartía. "Me encontré muy a gusto, en una atmósfera social confortable." De todas maneras, seguía pensando que su estancia norteamericana sería temporal y que acabaría regresando a Europa. "Me había hecho a la idea de que no me iba a quedar para siempre."

Pero Blobel ha permanecido desde entonces en los Estados Unidos, país cuya ciudadanía le fue concedida.



1. "No fue el descubrimiento de una tarde de domingo": Günter Blobel, premio Nobel de 1999, investiga desde 1971 de qué modo las proteínas cruzan las membranas

Tras obtener su título, consiguió una beca postdoctoral en el laboratorio de George Palade en la Universidad Rockefeller, que también ganó un premio Nobel en 1974 por su trabajo sobre la síntesis celular de proteínas. En la Rockefeller, Blobel y otro joven investigador, David Sabatini, empezaron a desarrollar las ideas que le valdrían el Nobel.

Las células sintetizan las proteínas en los ribosomas, partículas que se adhieren al exterior del retículo endoplasmático (RE), una red de membranas que surca la célula. Los ribosomas son las líneas de montaje donde las moléculas de ARN mensajero, que contienen información genética copiada del ADN del núcleo, sirven de plantilla para encadenar aminoácidos con los que se fabrican las proteínas. Los estudios de Palade y de otros habían mostrado que algunas proteínas recién formadas se las arreglaban para atravesar la membrana del RE, penetrar en su interior y acabar siendo segregadas por la célula en minúsculas burbujas de membrana llamadas vesículas.

Blobel y Sabatini querían conocer el mecanismo de semejante circulación tan delicadamente orquestada. Al fin y al cabo, las proteínas son moléculas hidrófilas, pero se las arreglan para atravesar las barreras lipídicas de las membranas intracelulares y recorrer la célula de una parte a otra. Los biólogos propusieron en 1971 que cada proteína en formación debía tener una señal en uno de sus extremos que le sirviera de cédula con la que dirigirse a su destino correcto.

Aunque Sabatini siguió por otros derroteros, Blobel continuó dedicándose a lo que se conoció por "hipótesis de la señal". A la vez que fue escalando puestos hasta llegar a catedrático de la Universidad Rockefeller en los años setenta, identificó la etiqueta donde se indica la dirección: el péptido de señal. A principios de los noventa, había identificado con su equipo el poro que las proteínas utilizan a modo de túnel para atravesar las membranas, lo que explica cómo se mueven las proteínas hidrófilas a través de barreras lipídicas. También ese grupo por él liderado había descrito la secuencia bioquímica completa a través de la cual las proteínas segregadas penetran en el RE y había determinado cómo se mantienen juntas las proteínas cuyas funciones requieren que permanezcan unidas en una membrana.

2. La cúpula de la Frauenkirche domina el paisaje urbano de Dresde en este cuadro de 1747 (derecha). *Pero tras el bombardeo aliado del 13 y 14 de febrero de 1945, sólo quedaron las ruinas, como muestra la fotografía inferior, tomada en la postguerra. Existe un proyecto internacional para devolverle a la iglesia su esplendor de antaño*





Los hallazgos de Blobel tienen consecuencias importantes para la comprensión y tratamiento de diversas enfermedades, entre ellas la de Alzheimer, el desarrollo prematuro de cálculos renales y la fibrosis quística. En este último trastorno, por ejemplo, la proteína que regula el nivel de un tipo de sal en las células no consigue llegar a la superficie de la célula. Por culpa de ello, se forma una mucosidad pegajosa en los pulmones y en otros órganos, que predisponen a quien padece el mal a infecciones que resultan letales.

Blobel —un hombre alto y locuaz, con espeso cabello blanco, que conserva aún en su acento un dejo alemán— sostiene que le sorprendió recibir la llamada telefónica de Suecia participándole que había ganado el Nobel, aunque durante años había sonado su nombre como candidato en biomedicina. Su decisión de donar la recompensa monetaria para reconstruir la *Frauenkirche* fue inmediata. "Estaba totalmente claro que lo iba a hacer."

No ocurre todos los días que alguien done casi un millón de dólares que le han caído del cielo. La mayoría de los científicos que han ganado el premio trabajaron con tesón durante años por sueldos modestos en instituciones académicas y consideran con justicia esa suerte inesperada una compensación tardía. Algunos ceden su dinero para la investigación, otros se compran una casa; hay quien se gasta al menos una parte en alguna que otra frivolidad, como la pista de croquet de césped de 1000 metros cuadrados que se hizo construir Richard J. Roberts, ganador del Nobel de fisiología y medicina en 1993.

Pero la Rockefeller es conocida por su generosidad con los profesores. Blobel trabaja, además, para el Instituto Howard Hughes de Investigaciones Médicas, uno de los financiadores tradicionales de la biomedicina, aparte del Instituto Nacional de la Salud. Y él y su mujer, Laura Maioglio (propietaria del reputado restaurante Barbetta, en el centro de Manhattan) no tienen hijos, "algo que lamento", dice. Así que aunque podrían haberse comprado un chalet como complemento al apartamento que tienen en Park Avenue, decidieron que el dinero lo entregarían a la *Frauenkirche*.

La contribución de Blobel al presupuesto de los Amigos de Dresde lo ha hecho ascender a unos 2 millones de dólares, más o menos (un quinto de la suma requerida para construir lo que llama "el ala americana" de la iglesia). La obra completa, que se espera terminar en el 2004, costará unos 200 millones de dólares, que están recaudándose entre otros grupos y corporaciones de todo el mundo. "Espero que mi donación del dinero del premio Nobel estimule a otra gente a dar más."

CIENCIA Y SOCIEDAD

Aerogeles

Humo helado

Los aerogeles son, hoy por hoy, los materiales sólidos más ligeros que se conocen. Deben su elevada liviandad a una gran porosidad. Se comportan como una espuma sólida de celda abierta con una extensa área superficial. Los poros presentan una amplia distribución de tamaños, aunque su diámetro típico suele ser de 15-20 nanómetros; ocupan alrededor del 95 % del volumen total. La densidad del aerogel oscila entre 0,30 gramos por centímetro cúbico y 0,003 g/cm^3 (sólo tres veces más denso que el aire). Su estructura es amorfa, como la del gel del que provienen.

Las partículas coloidales que forman el sol deben tener tamaños inferiores a la micra para que no sedimenten y el sol sea estable. El líquido dispersante suele ser agua o alcohol. En determinadas condiciones, el sol se endurece y origina un gel. Así ocurre cuando las partículas coloidales entran en contacto y se unen creando una estructura capilar continua, llena de líquido.

A diferencia del sol, el gel muestra cierta rigidez y elasticidad. En efecto, las partículas coloidales del sol, antes dispersas, se encuentran ahora unidas en las tres dimensiones por enlaces de valencia, puentes de hidrógeno o incluso fuerzas dipolares. ¿Cómo podemos eliminar el líquido del gel sin dañar la estructura porosa que lo sustenta?

El procedimiento seguido durante años consistía en filtrar el precipitado del solvente, tarea lenta y pesada, para secarlo luego en un horno, a presión atmosférica o al vacío. En estas condiciones, mientras se evapora el solvente, aparece una interfase líquido-vapor en el interior de los poros del gel; la tensión superficial del líquido crea un menisco cóncavo en cada capilar.

Durante la evaporación, el menisco retrocede y la fuerza de compresión ejercida contra las paredes de los poros produce el hundimiento de la estructura del gel. La porosidad resultante es muy inferior a la que poseía inicialmente el gel. El volumen de los poros y el área superficial del gel seco son menores: se ha producido "xerogel".

En 1930, S. S. Kistler empleó el secado supercrítico para eliminar el líquido y obtener un sólido seco. El resultado lo denominó aerogel. Debido a que en condiciones supercríticas no existe tensión superficial, el sólido logrado apenas había perdido volumen respecto al gel original.

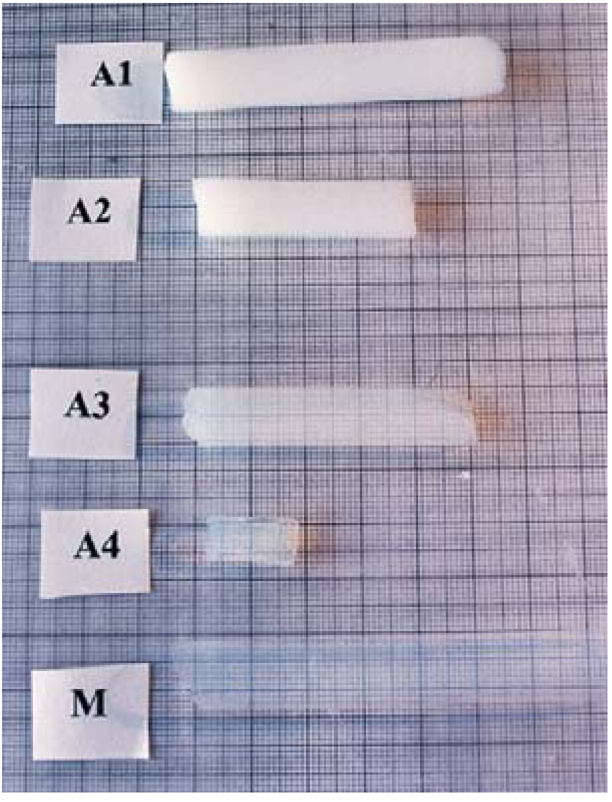
En 1960, Teichner y Nicolaon se propusieron crear matrices altamente porosas. Aunque se apoyaron en las ideas de Kistler sobre secado supercrítico, simplificaron la físico-química del método reduciendo a pocas horas el tiempo de preparación del aerogel. Con el interés creciente en los aerogeles, se han superado obstáculos inherentes al secado supercrítico y se han desarrollado procesos basados en el intercambio del solvente inicial por carbónico líquido.

El más estudiado de los aerogeles es el de sílice. Para su obtención se puede jugar con el alcóxido de silicio de partida, el solvente y el catalizador, variables que nos permiten diseñar un aerogel a medida, dotado de las propiedades deseadas. El gel de sílice se seca directamente en una autoclave en condiciones supercríticas. El aerogel de SiO_2 obtenido tiene unas partículas de entre 5 y 50 nm de diámetro, una área superficial de unos 700 m^2/g y una densidad aparente de 0,1 g/cm^3.

La alta porosidad y baja densidad de los aerogeles explican su ínfima conductividad térmica, en torno a unos 0,007 watt por metro y por kelvin, lo que corresponde a un coeficiente de pérdidas total de 0,07 watt por metro cuadrado y por kelvin para una lámina de aerogel de sílice transparente de 1 cm de espesor.

La forma monolítica y transparente de los aerogeles de sílice los hace indicados para aislantes térmicos de ventanas. Gracias a ese mismo carácter, su aplicación en colectores pasivos de energía solar reduciría de manera importante la demanda energética para calefacción en invierno.

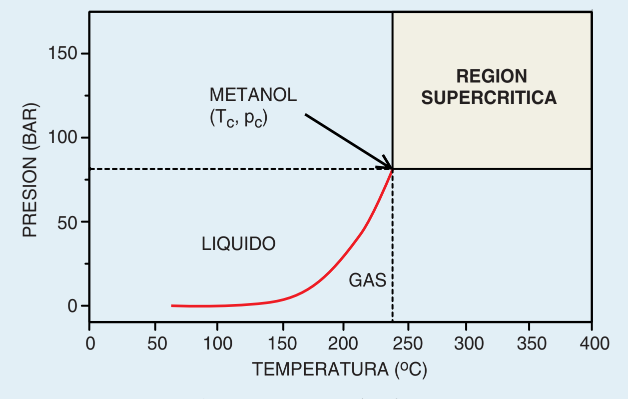
Es sabido que la longitud de onda del sonido es directamente proporcional a la velocidad de propagación en el medio e inversamente proporcional a la frecuencia de vibración. Esta ley de propagación del sonido a través de medios isótropos homogéneos rige también en ondas de calor, cuyas vibraciones elementales se denominan fonones y representan cuantos de energía proporcionales a la frecuencia de vibración. En los aero-



Algunos aerogeles obtenidos en el Laboratorio de Altas Presiones del Instituto de Ciencia de los Materiales de Barcelona (CSIC) y Carburos Metálicos, S.A.

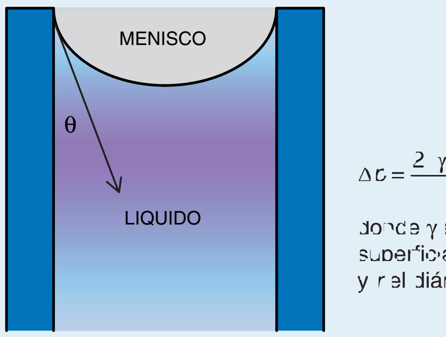
Secado supercrítico

El punto crítico define el final de la rama que separa las fases líquida y gaseosa del diagrama de fases y que parte del punto triple de equilibrio entre las tres fases sólido-líquido-gas. El punto crítico queda definido por la temperatura y presión críticas (Tc, pc), que son características de cada sustancia pura.



1. Diagrama de fases

La zona con temperaturas y presiones más altas se denomina zona o región supercrítica. Al alcanzar el punto crítico, el menisco de separación entre fases se difunde y el 'fluido' resultante presenta características cruzadas entre las de un líquido y un gas. Así, la densidad se aproxima a la de un líquido, mientras que la compresibilidad o la viscosidad se parecen a las de un gas. El secado supercrítico anula los fenómenos de tensión superficial. Cuando un gel coloidal se deja secar al aire, su esqueleto se desploma inducido por las enormes presiones capilares que se producen en sus poros situados a la altura del menisco de la interfase líquido-gas. La tensión superficial en el poro produce una presión capilar inversamente proporcional al radio de aquél; si el radio es de unos 50 nm la presión es de unos 103 bar.

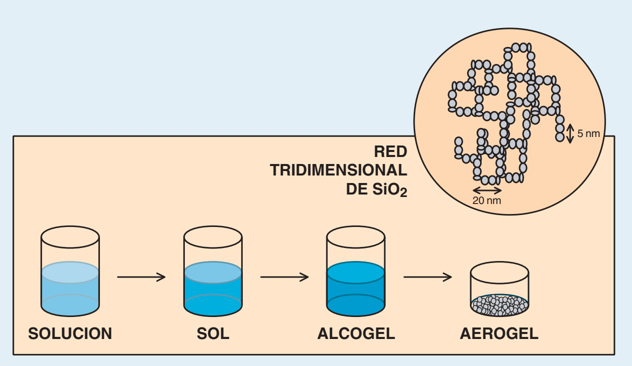


$$\Delta p = \frac{2\ \gamma\ \cos\theta}{r}$$

donde γ es la tensión superficial del líquido y r el diámetro del poro

2. Presión capilar en un poro de un gel lleno de solvente

El secado supercrítico de un gel permite evacuar el solvente sin el desplome de la estructura. El lugar ocupado por el líquido lo llena el aire, por lo que el sólido resultante se denomina aerogel. El material se puede preparar en forma monolítica, ya sean láminas o bloques, o en forma pulverulenta.



3. Esquema de una reacción de polimerización sol-gel

geles los poros impiden la propagación de vibraciones, que quedan así localizadas. Pudieran emplearse en detectores sónicos de alta resolución.

El índice de refracción de un aerogel de sílice depende de su densidad. Variando la relación alcóxido-alcohol en el alcogel se puede controlar fácilmente dicha densidad. Los aerogeles transparentes de sílice pueden utilizarse en contadores Cerenkov de partículas de alta energía. Hasta ahora los contadores Cerenkov han venido empleando gases presurizados en condiciones criogénicas, con índices de refracción en el rango 1,0-1,3. Los mismos valores del índice de refracción se pueden obtener en aerogeles transparentes de sílice.

Las extensas áreas superficiales y la alta porosidad de los aerogeles constituyen propiedades atractivas en el dominio de la catálisis heterogénea y los substratos de catalizadores. Puesto que la actividad catalítica resulta a menudo de una interacción entre substrato y catalizador en estado sólido, la capacidad de los aerogeles de mantenerse en estado amorfo podría permitir que la interacción se realizara a temperaturas bajas.

La preparación del catalizador a bajas temperaturas tiende a preservar su textura porosa y extensa área superficial limitando su compactación. Los catalizadores de aerogel son más activos y selectivos para ciertas reacciones que los catalizadores habituales. De ese modo, los aerogeles han irrumpido con fuerza en el espacio, favorecidos por su baja densidad. Han servido de aislamiento térmico en detectores Cerenkov. Se les ha aplicado a la captura de micrometeoritos, que quedan atrapados en el aerogel.

Infinitas son las aplicaciones posibles de los aerogeles, desde abrasivos para dentífricos hasta filtros de gases, pasando por soporte de crecimiento biológico, desalinización de agua, condensadores eléctricos de alta capacidad, insecticidas, etcétera.

Además, los aerogeles de sílice son inertes y no contaminantes. Dada su baja densidad, se consume poca materia en su producción. Los solventes y el anhídrido carbónico, empleados en la síntesis y secado, se pueden recuperar y reutilizar. La energía invertida en el proceso, si éste se realiza a temperatura ambiente, es tan sólo la necesaria para licuar el gas carbónico.

ANNA ROIG y ELIES MOLINS
Instituto de Ciencia de los Materiales de Barcelona (CSIC)
Universidad Autónoma de Barcelona

Serotonina y adicción

Mecanismo de acción de la cocaína

La cocaína actúa en el cerebro a través de su unión a las proteínas transportadoras encargadas de eliminar la dopamina, serotonina y noradrenalina, una vez que estos neurotransmisores han enviado la señal neuroquímica a las neuronas postsinápticas. Si bloqueamos con cocaína las proteínas transportadoras, aumentan los niveles de los tres neurotransmisores, lo que comporta una hiperestimulación de determinadas rutas nerviosas.

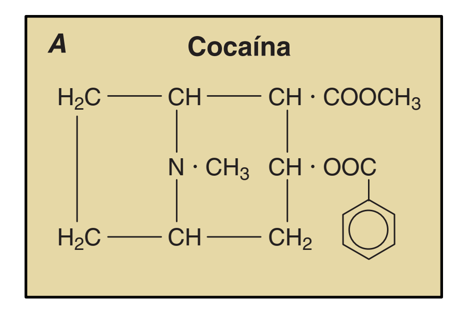
La intensificación de la transmisión dopaminérgica desempeña un papel crucial en la mediación del efecto hedonista y adictivo de la cocaína. En experimentos con roedores, tras implantarles un catéter intravenoso permanente, se les enseña que, accionando una palanca, reciben una inyección de cocaína a través del catéter conectado a la palanca mediante un dispositivo dosificador. Tanto la destrucción de la ruta dopaminérgica que proyecta del cerebro medio al núcleo del acumbens, como la administración de fármacos que bloquean receptores (antagonistas) de dopamina, disminuyen la autoadministración de cocaína. De forma análoga, los roedores aprenden a autoadministrarse fármacos que activan receptores (agonistas) dopaminérgicos o que bloquean de manera selectiva el transportador de dopamina.

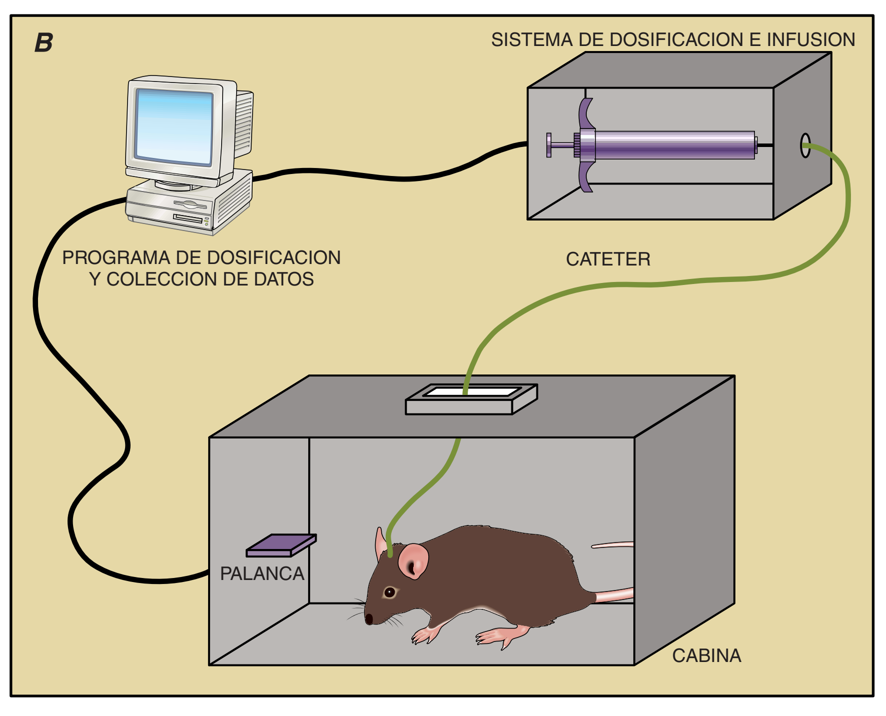
La producción de ratones mutantes carentes de un determinado subtipo de receptor o de transportador mediante manipulación genética constituye un planteamiento complementario a los estudios farmacológicos. Así se ha resuelto la importancia del neurotransmisor serotonina, que no pudo desentrañarse mediante técnicas farmacológicas. El receptor de serotonina 1B interviene de forma destacada en el desarrollo de la adicción a cocaína. Los ratones carentes del receptor de serotonina 1B mostraron una motivación mayor que los ratones normales en experimentos de autoadministración.

También en los ratones carentes del receptor de serotonina 1B se ha estudiado el fenómeno de la sensibilización comportamental, consistente en el aumento progresivo en la actividad motora de los ratones en respuesta a sucesivas inyecciones de cocaína. Se ha sugerido que los cambios bioquímicos responsables de esta sensibilización son los mismos que conducen a la adicción. Los ratones carentes del receptor de serotonina 1B se comportaron como si la supresión del receptor produjera *per se* un estado similar al sensibilizado.

En definitiva, las investigaciones llevadas a cabo con los ratones carentes del receptor de serotonina 1B sugieren que este receptor es importante en el desarrollo del estado adictivo y que estos animales pueden ser un modelo para estudiar las claves bioquímicas responsables de las diferencias individuales en cuanto a susceptibilidad a adicción. Además, este trabajo plantea preguntas acerca del mecanismo por el cual la supresión del receptor de serotonina 1B resulta en un estado presensibilizado. Quizás, al encontrarse este receptor en los terminales sinápticos que inhiben las neuronas dopaminérgicas, la hipersensibilidad a cocaína se deba a una hiperactividad del sistema dopaminérgico.

Los ratones carentes de transportador de dopamina, en contra de lo que cabía esperar, no pierden la capacidad de autoadministrarse cocaína. Para investigar qué efectos puede estar produciendo la cocaína en un cerebro sin transportador de dopamina, se analizó mediante autorradiografía en qué regiones del cerebro se fija un análogo radiactivo de la cocaína. Asimismo, se estudió la inducción de *c-fos* (un factor de transcripción que se induce de forma rápida y transitoria en ciertas neuronas tras una estimulación puntual). Los resultados obtenidos por ambas técnicas fueron similares en los cerebros de ratones mutantes y de ratones normales. Curiosamente, las regiones sobre las que estaba actuando la cocaína se caracterizan por reci-





Fórmula química de la cocaína (A). *Dispositivo para estudios de autoadministración en roedores* (B). *Mediante cirugía, le es implantada al animal una vía permanente en la vena yugular. Una vez que el ratón se recupera de la operación, se le conecta un catéter a la vía y se le entrena en una cabina de condicionamiento operante. En ésta, el animal aprende que al accionar una palanca obtiene una recompensa. En este caso, una inyección intravenosa de una solución de cocaína. El sistema cuenta con una bomba de infusión que dosifica la cocaína y cuyo funcionamiento lo controla un ordenador*

bir una densa inervación serotonérgica. En consecuencia, la autoadministración en los ratones carentes del transportador de dopamina pudiera derivar de la capacidad de la cocaína para bloquear el transporte de serotonina y del consiguiente aumento de los niveles de serotonina.

En resumen, los sistemas dopaminérgico y serotonérgico desempeñan papeles complementarios a la hora de mediar los efectos adictivos de la cocaína.

José Javier Lucas
Centro de Biología Molecular
Severo Ochoa, Madrid

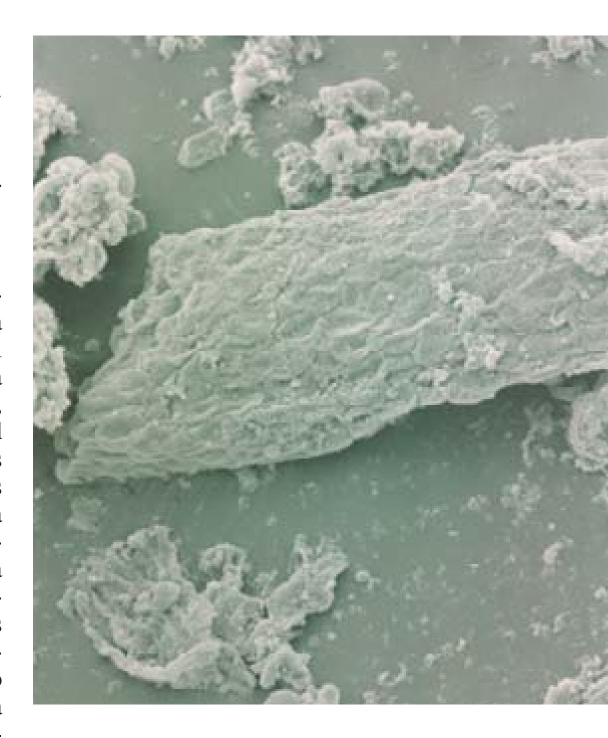
Polen

Reconstrucción de paleoambientes

Entre las diversas disciplinas y técnicas que permiten una aproximación a la dinámica del paisaje y el clima del pasado, el estudio del contenido polínico de los sedimentos supone una de las vías de mayor potencial informativo. La extrema resistencia de las estructuras exteriores de los granos de polen hace posible que, bajo las condiciones ambientales adecuadas, se conserven integrados en los depósitos sedimentarios, constituyendo un auténtico registro de la evolución de la vegetación.

Cada especie vegetal presenta unos requerimientos térmicos e hídricos determinados. La respuesta de la vegetación ante los cambios operados en el régimen climático se materializa en la distribución geográfica de las especies y en la diversidad de las relaciones que entre ellas se han establecido a lo largo del tiempo. Durante el Cuaternario se produjeron cambios constantes en la composición de los tipos de vegetación que conformaban el paisaje, según se nos revela a partir de los registros polínicos.

Existen importantes diferencias entre la dinámica de la vegetación en la cuenca mediterránea y los modelos establecidos para la Europa central y septentrional. En el ámbito mediterráneo, la existencia de importantes gradientes ambientales hace especialmente compleja la reconstrucción paisajística, ya que la respuesta de la vegetación en relación al cambio climático se halla muy condicionada por particularidades regionales.



Fotografía de microscopio electrónico de barrido en la que se aprecia un fragmento de estambre de boj contenido en un coprolito de Myotragus balearicus *recuperado en la isla de Mallorca. (Cortesía de Riker Yll y J. Pantaleón Cano.)*

En el marco del proyecto ARIDUSEUROMED, financiado por la Unión Europea y coordinado por el grupo de paleopalinología de la Universidad Autónoma de Barcelona, se ha observado una gran diversidad de respuestas de la vegetación a los impactos climáticos y antrópicos acaecidos durante el Holoceno en la vertiente mediterránea de la península Ibérica y las islas Baleares. Queda así resaltado el interés de las formaciones arbustivas naturales en las zonas estudiadas, la entidad del sudeste español como área de refugio de la vegetación termófila durante la última glaciación o las grandes transformaciones del paisaje vegetal detectadas a partir de 5000 años antes del presente. Un hecho que cabe interpretar como un fenómeno generalizado de aumento de la xericidad ambiental y que se manifestaría, por ejemplo, en la sustitución de una vegetación de carácter mesófilo por maquias dominadas por el acebuche en las islas Baleares o en el establecimiento de las condiciones ambientales semiáridas que caracterizan el sudeste peninsular.

A este respecto, una posible influencia de las actividades humanas sobre el medio no parece verosímil, salvo en el área levantina, donde habría una persistente incidencia humana sobre el paisaje vegetal hasta época medieval.

En las zonas estudiadas de Almería no parece haber existido un grado de cobertura forestal importante desde el final de la última glaciación, pues los diferentes episodios identificados se caracterizan por la alternancia entre las formaciones estépicas y las arbustivas en relación a unas limitaciones fundamentalmente bioclimáticas. Entre los 18.000 y los 15.000 años antes del presente, el territorio aparecía dominado por comunidades arbustivas con una gran presencia del acebuche, mientras que entre los 15.000 y los 7000 años el dominio territorial correspondía a formaciones estépicas y entre los 7000 y los 4500 años se evidenciaba el máximo recubrimiento vegetal. A partir de ese momento, la transformación radical del paisaje registró el establecimiento de las condiciones que llegan hasta nuestros días y que se traducen en la marginalización de la maquia y el impacto de intensos procesos erosivos en un territorio progresivamente desforestado.

En las islas Baleares, la primera mitad del Holoceno, caracterizada por la abundancia de avellano, boj y otros elementos mesófilos, se definiría por un régimen climático más húmedo y de menor estacionalidad que el actual. A partir de los 5000 años antes del presente se detectaría, como en Almería, una gran transformación del paisaje vegetal tanto en su composición como en su estructura. La expansión de una vegetación más adaptada a unas condiciones climáticas mediterráneas se da de forma compleja. El proceso de cambio, que en el caso de la isla de Menorca llevó a la extinción de especies vegetales como el boj o el avellano, operó en sincronía con la extinción de diversas especies animales. La simultaneidad de estos procesos refuerza la idea de la existencia de una estrecha conexión entre extinciones, máxime cuando el análisis polínico de coprolitos de una de las especies animales afectadas (*Myotragus balearicus*) ha demostrado la dependencia dietética de este animal del boj.

José Pantaleón Cano
Villanueva
Unidad de Botánica
Departamento de Biología
Universidad Autónoma
de Barcelona

El arrugado del papel

Un punto de vista físico

En nuestro mundo de tres dimensiones las superficies limitan y definen distintas regiones del espacio. La cabina de un vehículo de transporte, nuestras viviendas, incluso el vestuario y nuestra piel nos aíslan del medio exterior.

Las posibilidades son múltiples. Así, un arquitecto manipula superficies para diseñar espacios confortables. En muchos casos, la superficie consiste en cortes y adiciones de secciones pequeñas, combinaciones tales como las que obtendría un modisto en el diseño y confección de una prenda para vestir.

Los científicos, sin embargo, nos concentramos en las posibilidades de cambios de forma o "deformaciones" de superficies en las que están prohibidos cortes y adiciones: cubrir una mesa con un mantel, arrugar un papel o deformar una membrana biológica son ejemplos de ello.

Dos tipos de deformaciones son posibles en una superficie elástica, sin que ello signifique una violación de nuestra regla. Nos referimos al doblamiento y estiramiento. Por el primero se entiende la deformación que no implique un cambio de longitud de superficie en alguna dirección; con el segundo se alude a lo contrario, incluido el encogimiento.

Doblamiento y estiramiento pueden darse por separado o en conjunto. Pero si una superficie es lo suficientemente delgada, el doblamiento requiere menos inversión energética. Una superficie con la libertad adecuada se deformará por esta vía. Lo comprobamos cuando se introduce un papel entre las manos y las cerramos: la superficie ocupa un volumen menor y se deforma; no se encoge, sino que se dobla.

En términos matemáticos, una superficie que se deforma por doblamiento se dice que es desarrollable. Numerosos teoremas generales hay al respecto, comenzando por los trabajos de Gauss en la primera mitad del siglo XVIII, quien demostró que una superficie desarrollable tiene siempre al menos una dirección en que se puede dibujar una línea recta, o lo que se denomina generador de la superficie. Ello restringe enormemente el número de superficies aceptables. De hecho se limitan a cuatro, a saber, el plano (que tiene generadores en infinitas direcciones), el cilindro, el cono y la superficie tangente.

También se aceptan combinaciones de estas superficies, en cuyo caso los generadores se quiebran y dan origen a los llamados "nervios". Una de las situaciones simples ocurre al empujar un papel dentro de un soporte cilíndrico; en la región de contacto el papel forma un cono perfecto, pero en cierto punto del soporte se despega y se torna desarrollable, razón por la cual hemos denominado a la singularidad cónica que se forma "d-cono" ideal. En la punta del d-cono se quiebran los generadores y se encuentra la singularidad propiamente tal. En este tipo de estructura se fundan situaciones más complejas.

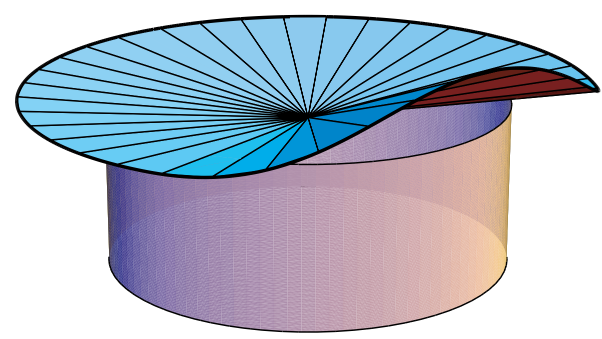
Sea un mantel que cubre una mesa circular. El mantel es plano sobre la superficie de la mesa, si bien en el borde forma un conjunto de pliegues cónicos que se combinan con la parte plana a través de un borde o nervio que aproximadamente coincide con el extremo de la mesa. En las superficies arrugadas de esta guisa aparecen los d-conos.

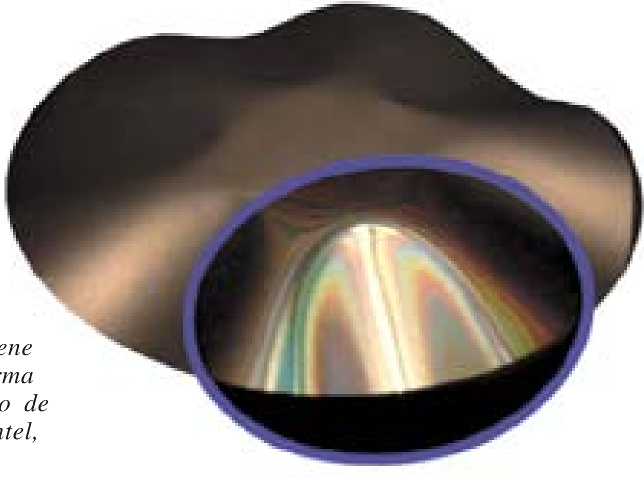
En la práctica, sin embargo, los d-conos no presentan una singularidad en su vértice. Lo ilustra la imagen de un mantel obtenida por la técnica de fotoelasticidad, en donde cada color nos da indicación de los generadores. Aquí los generadores no se quiebran en un punto, sino en el tamaño de la singularidad, una región. La razón de ello estriba en que existe también deformación por estiramiento. Por eso, el tamaño de la singularidad decrece con la disminución del espesor de la superficie. La estructura completa, salvo las zonas cercanas a las singularidades, puede obtenerse sólo por la optimización de la energía de doblamiento.

El d-cono vendría a ser el "átomo de hidrógeno" del arrugamiento, una estructura que requiere poca energía de doblamiento y permite reducir drásticamente el volumen ocupado por la superficie.

¿Qué ocurre cuando sometemos una superficie a fuerzas deformantes? Se comprueba que la fuerza deformante requerida para construir el d-cono tiene cierto umbral, traspasado el cual éste no ofrece mayor resistencia y se desploma para engendrar una nueva geometría con nuevos d-conos. Hacer compatible dos d-conos requiere de un nervio. La estructura producida, aunque más resistente, presenta también un umbral allende el cual colapsa otra vez. Tras una serie de acontecimientos similares, la estructura adquiere una complejidad creciente y origina la forma visual típica de un arrugado.

ENRIQUE CERDA y FRANCISCO MELO
Centro para la Investigación Avanzada en Ciencias de los Materiales
Universidad de Santiago de Chile





Cada d-cono de la figura de este mantel de acetato tiene una parte cóncava y una convexa limitada por una forma parabólica, cuyo radio de curvatura constituye el tamaño de la singularidad. Al analizar la luz reflejada por el mantel, cada color representa la forma de un generador

Genética vegetal

Tolerancia al aluminio

La cantidad de ciertos metales en el suelo influye en los rendimientos agrícolas. Su exceso o escasez limitan la producción. Uno de esos metales críticos es el aluminio. La mayoría de las especies se muestran altamente sensibles a pequeñas concentraciones de Al cuando se encuentra en formas solubles en el suelo, solubilidad que se ve favorecida en medios con *p*H ácido.

Los suelos ácidos son propios de zonas tropicales y subtropicales. Sin embargo, el empleo de abonos nitrogenados y la aparición de la "lluvia ácida" han producido la acidificación de áreas agrícolas que no padecían problemas de toxicidad del Al. El primer síntoma de dicha toxicidad se manifiesta en la inhibición del crecimiento de la raíz.

Para mantener la productividad de suelos ácidos se aplican sustancias alcalinizantes, calcáreas por lo común. Pero su efecto es transitorio y de corto alcance, pues la acción neutralizante no llega a las zonas profundas del suelo donde sí penetran las raíces. Mejor sería potenciar la tolerancia a los metales.

La identificación de los genes responsables de la tolerancia al Al permitiría su manipulación ulterior. Entre los cereales, el centeno es el más tolerante; el trigo, uno de los menos. Aquel es una especie diploide con bajo número de cromosomas ($2n = 14$) y su hibridación con el trigo resulta bastante asequible. Por eso, nuestro equipo de la Universidad Complutense ha decidido estudiar la genética de la tolerancia al Al en el centeno.

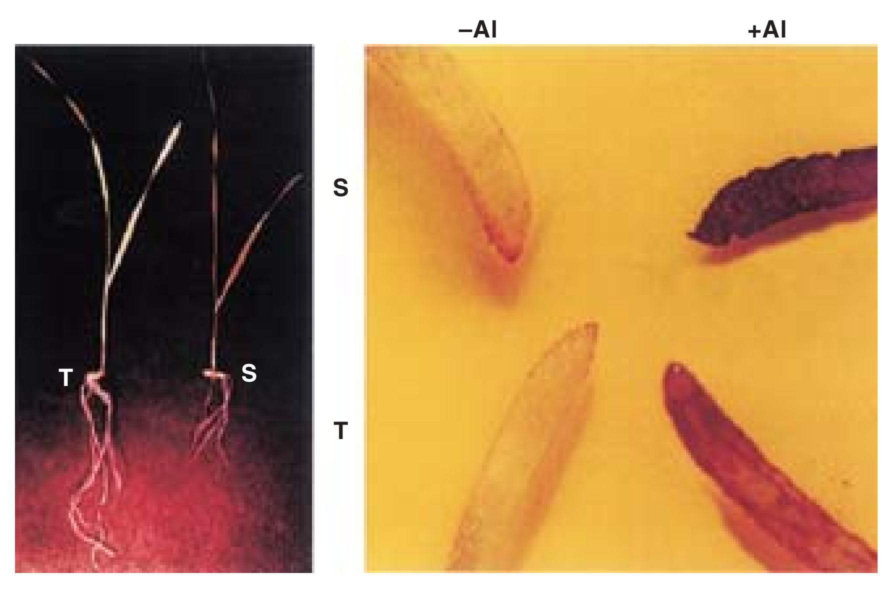
Decidimos empezar por averiguar el número mínimo de genes implicados en la tolerancia al Al exhibida por el centeno y su modo de herencia. Posteriormente, emprendimos la identificación de los cromosomas en los que se ubican estos genes y la búsqueda de marcadores moleculares estrechamente ligados. A partir de estos marcadores se aborda el aislamiento de los genes que confieren la tolerancia.

Identificamos una línea consanguínea de centeno susceptible al aluminio. Las raíces de las plantas susceptibles a Al muestran alteraciones morfológicas. Con el análisis de los descendientes de cruzamientos entre plantas tolerantes y no tolerantes (línea consanguínea) descubrimos la existencia de al menos dos genes independientes, con herencia dominante y efecto aditivo (*Alt1* y *Alt3*).

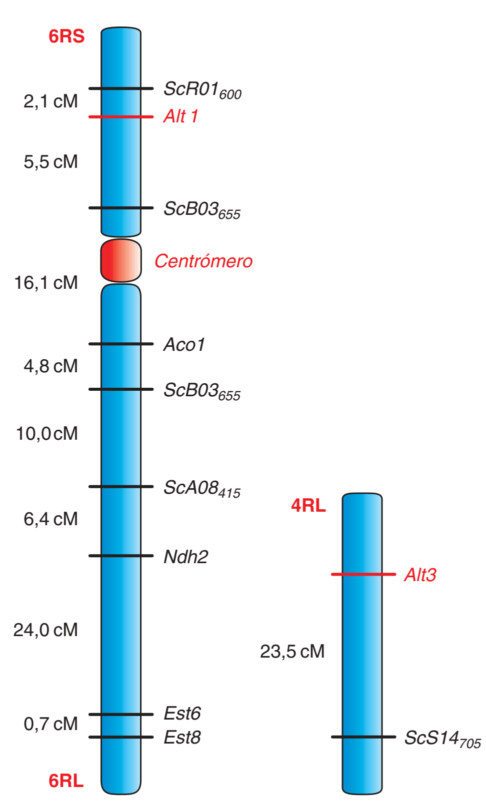
El estudio de marcadores isoenzimáticos y moleculares ha permitido localizar el gen *Alt1* en el brazo corto del cromosoma 6R y el gen *Alt3* en el brazo largo del cromosoma 4R. Una vez detectados y localizados los genes de tolerancia *Alt1* y *Alt*3, se buscan marcadores moleculares estrechamente ligados. Para ello empleamos tres estrategias diferentes.

La primera consiste en utilizar líneas de adición trigo-centeno para identificar, mediante una variante de la reacción en cadena de la polimerasa, piezas de ADN específicas de centeno localizadas en el mismo brazo cromosómico que los genes de tolerancia.

Otra estrategia es analizar simultáneamente la segregación de los genes de tolerancia y de diferentes marcadores moleculares para buscar la existencia de ligamiento. Este método, lento, requiere un esfuerzo enorme, ya que es necesario analizar en muchos descendientes (alrededor de 100) una gran cantidad de marcadores moleculares distribuidos por todo el genoma. Aplicamos, pues, otro método, el análisis de bloques de plantas tolerantes y sensibles, un sistema más rápido para detectar piezas de ADN ligadas a los genes de tolerancia. Aislamos, clonamos y se-



1. Diferencia en el crecimiento de las raíces entre plantas tolerantes (T) *y susceptibles* (S) *después de un tratamiento de 24 horas con Al a una concentración de 150 µM. La parte derecha muestra los daños que se producen en el meristemo radicular de plantas susceptibles* (S) *tratadas con aluminio* (+Al)*, comparándolas con plantas susceptibles* (S) *y tolerantes* (T) *tratadas* (+Al) *y sin tratar con aluminio* (–Al)



2. Mapas de los cromosomas 6R y 4R de centeno en los que, además de los genes de tolerancia al aluminio Alt1 y Alt3, se indica la posición de los marcadores moleculares e isoenzimáticos ligados

cuenciamos las piezas de ADN obtenidas.

El tercer sistema empleado fue diseñar parejas de cebadores específicos a partir de ADN complementarios de ARN mensajeros que se inducen por estrés de Al. Estos cebadores nos permitirían amplificar en el centeno genes homeólogos a los de trigo relacionados con la tolerancia. Conseguimos un segmento de ADN de centeno que presentaba una elevada homología con el correspondiente de trigo, localizado en el cromosoma 4R. En trigo se ha detectado un gen de tolerancia al aluminio en el cromosoma 4D que podría ser homeólogo del gen *Alt3* descrito en centeno.

Disponemos ahora de marcadores moleculares estrechamente ligados al gen *Alt1*; estamos desarrollando nuevos marcadores y estudiando nuevos cruzamientos para encontrar piezas de ADN totalmente ligadas a *Alt1* y *Alt3*. Nuestra meta es aislar los genes de tolerancia de centeno e introducirlos en trigo.

CÉSAR BENITO
y FRANCISCO J. GALLEGO
Departamento de Genética
Facultad de Biología
Universidad Complutense
de Madrid

Epidemiología española

Enfermedades cardiovasculares

Por su elevada morbilidad y mortalidad, el grado de discapacidad que originan y su gran repercusión socioeconómica, las enfermedades cardiovasculares han adquirido máximo relieve en los países desarrollados. Las enfermedades del aparato circulatorio constituyen la primera causa de muerte en el conjunto de la población española, provocando más de ciento treinta mil muertes al año, lo que supone el 38 % de todas las defunciones producidas en 1995, con una influencia mucho mayor en las mujeres (44 %) que en los varones (32 %).

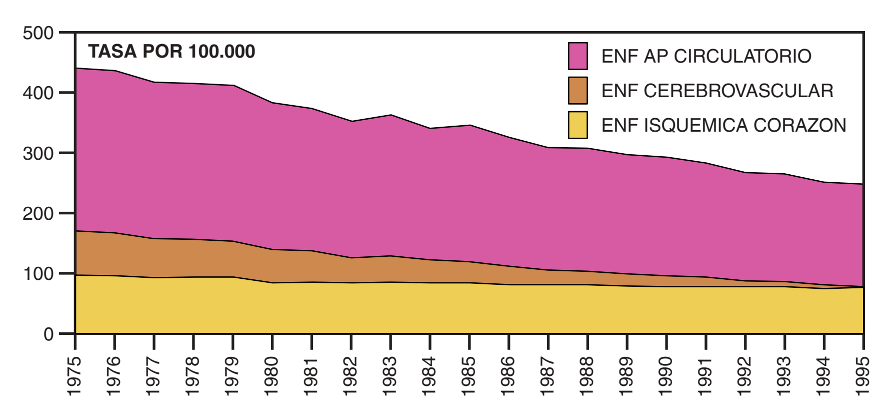
De sus múltiples formas, las dos más importantes son la enfermedad cerebrovascular (estados patológicos del sistema nervioso central de origen vascular) y la enfermedad isquémica del corazón (cardiopatía originada por déficit del riego coronario: infarto de miocardio y angina de pecho), que en conjunto producen cerca del 60 % de la mortalidad cardiovascular total. Desde 1987, en España mueren más varones por cardiopatía isquémica que por enfermedad cerebrovascular. En las mujeres en cambio todavía se mantiene el patrón mediterráneo de preponderancia de la enfermedad cerebrovascular sobre la coronariopatía.

La edad constituye un factor crucial. Las enfermedades cardiovasculares son la primera causa de muerte a partir de los 70 años, mientras que en edades medias la causa principal son los tumores. Para el conjunto de todas las edades, las enfermedades del aparato circulatorio ocupan el primer lugar como causa de muerte.

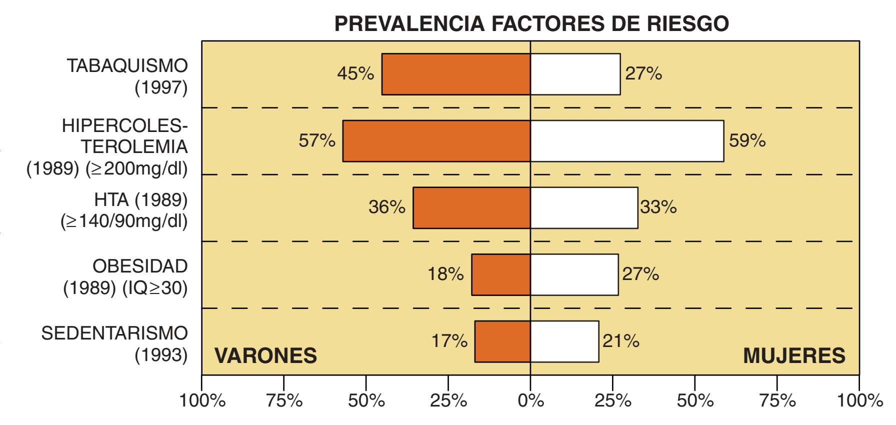
La distribución de la mortalidad cardiovascular difiere de una región española a otra. Presentan tasas elevadas de mortalidad cardiovascular la Comunidad Valenciana, Extremadura, Andalucía y Murcia; bastante menor, Madrid, Navarra, Castilla y León y Aragón. Canarias es un caso singular; presenta la tasa más alta de mortalidad por enfermedad isquémica del corazón y, sin embargo, su tasa por enfermedad cerebrovascular es de las más bajas.

Si se comparan las tasas de mortalidad ajustadas por edad de España con las de otros países occidentales se observa que, para el total de las enfermedades del aparato circulatorio y para la enfermedad isquémica del corazón, nuestra nación ocupa un lugar privilegiado con una de las tasas más bajas. En cuanto a la mortalidad por enfermedad cerebrovascular, se halla en una posición intermedia-baja.

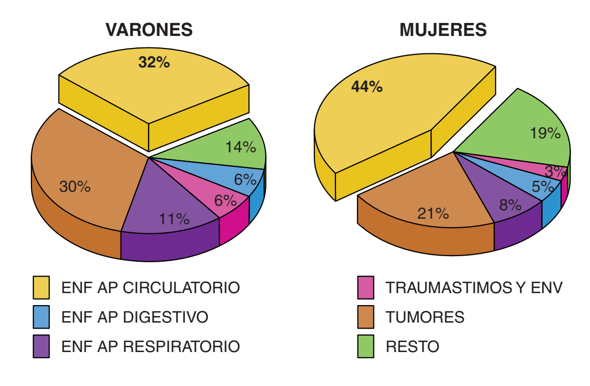
El riesgo de morir por enfermedades cardiovasculares en España está disminuyendo desde mediados de los años setenta. Las tasas de mortalidad cardiovascular estandarizadas por edad han disminuido a un ritmo anual del 2,6 % en las dos últimas décadas. Buena parte de este descenso de la mortalidad cardiovascular total se debe a una disminución media anual del 3,8 % en la mortalidad cerebrovascular, merced, seguramente, a una



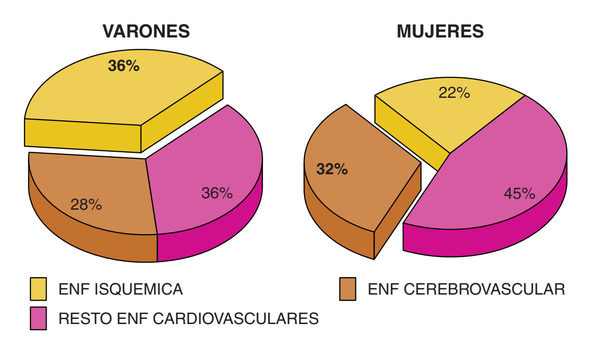
1. Tasa de mortalidad ajustada por edad de las enfermedades del aparato circulatorio, enfermedad cerebrovascular y enfermedad isquémica del corazón en ambos sexos en España. Período abarcado: 1975-1995



2. Prevalencia de factores de riesgo cardiovascular en España según el sexo



3. Distribución de la mortalidad proporcional por las principales causas de defunción en España según el sexo, año 1995



4. Distribución de la mortalidad por enfermedades del aparato circulatorio en España según el sexo, correspondiente al año 1995

mejora en la detección y control de la hipertensión arterial. También se ha producido en estos mismos años una ligera disminución de la mortalidad isquémica del corazón del 1 % anual.

La tasa de morbilidad hospitalaria de las enfermedades del aparato circulatorio en España es de 1108 por 100.000 habitantes, causando cerca de cinco millones de estancias hospitalarias en 1995. A su vez, la morbilidad por enfermedad isquémica del corazón es mucho mayor que la cerebrovascular en los varones, mientras que en las mujeres la morbilidad cerebrovascular es ligeramente superior a la isquémica.

El conocimiento de los principales factores de riesgo modificables de las enfermedades cardiovasculares permite su prevención. Los tres factores de riesgo cardiovascular modificables más importantes son el tabaquismo, la hipertensión arterial y la hipercolesterolemia. Intervienen también la diabetes, la obesidad, el sedentarismo y el consumo excesivo de alcohol. La epidemiología cardiovascular se caracteriza por tener una etiología multifactorial, la mutua potenciación de los factores de riesgo y su asociación frecuente.

El tabaquismo, principal causa de morbimortalidad prematura y prevenible en los países desarrollados, aumenta de dos a cuatro veces la probabilidad de padecer enfermedad coronaria y cerebrovascular. En España, es un factor de riesgo muy extendido. Según la Encuesta Nacional de Salud de 1997 un 36 % de los españoles de 16 años y más años fumaba.

La hipertensión arterial se asocia a un aumento de la incidencia de enfermedad cardiovascular, incluso cuando las elevaciones son ligeras. El 34 % (36 % en los varones y el 33 % en las mujeres) de la población española de 35 a 64 años de edad tienen hipertensión arterial (cifras de presión arterial iguales o superiores a 140 mm Hg de sistólica y 90 mm Hg de diastólica). El coste de la hipertensión arterial en España se estimaba en el año 1994 en unos 160.000-210.000 millones de pesetas.

Distintos estudios observacionales han confirmado el papel predictor y la existencia de una relación causal entre hipercolesterolemia y cardiopatía coronaria. La reducción de la colesterolemia produce una disminución de la incidencia y mortalidad por cardiopatía isquémica y enfermedad cardiovascular en general. Un 58 % (57 % en los varones y el 59 % en las mujeres) de la población española de 35 a 64 años de edad tiene una colesterolemia igual o superior a 200 mg/dl.

Las enfermedades cardiovasculares son y lo van a seguir siendo en un futuro próximo la principal causa de muerte, especialmente a partir de los setenta años de edad. La morbilidad cardiovascular muestra una evolución creciente.

FERNANDO VILLAR ALVAREZ
y JOSÉ RAMÓN BANEGAS BANEGAS
Dpto. de Medicina Preventiva
y Salud Pública
Facultad de Medicina
Universidad Autónoma de Madrid

De cerca

Texto y fotos: Pablo López González, César Megina y Josep-Maria Gili

El bosque animado



1. Pradera de la gorgonia Leptogorgia sarmentosa *a unos 30 m de profundidad sobre fondos dendríticos y de arena*

Los fondos marinos ofrecen uno de los espectáculos más fascinantes de la naturaleza sumergida, las praderas de gorgonias. Son organismos modulares, producto de la repetición exhaustiva de unas unidades, los pólipos, originadas por gemación.

En el litoral mediterráneo abundan las praderas de gorgonias a escasa profundidad. En ellas encontramos una amplísima variedad de especies que descansan y se mantienen al acecho de sus presas, hallan el substrato idóneo donde depositar sus puestas, las utilizan como refugio o buscan las partículas que retienen y les sirven de alimento. Algunos moluscos viven específicamente del cenénquima (tejidos vivos) de las gorgonias; sobre ellas se desarrolla, además, la parte sésil de su ciclo biológico.

Cierto es que la mayoría de los octocorales presentan defensas ante la depredación, por lo común de naturaleza mecánica (escleritos calcáreos microscópicos) y en algunos casos química (metabolitos secundarios). Pese a ello, hay casos de coevolución con la neutralización consiguiente de esas defensas, bien envolviendo los tejidos del octocoral en unas secreciones digestivas (membranas peritróficas) que protejan los epitelios digestivos de la acción mecánica de las prominencias cortantes de los escleritos del octocoral, o bien mostrándose "inmunes" a las sustancias químicas repelentes que han dado, a estos octocorales, un manifiesto éxito ecológico.





2. Pradera de la gorgonia Eunicella singularis *a unos 20 m de profundidad en zonas de roca*

3. Este crustáceo decápodo se mantiene inmóvil sobre Leptogorgia *confiando no ser visto gracias a la transparencia de su cuerpo*



4. El "microdepredador" Neosimnia spelta*, un molusco prosobranquio que se alimenta de los pólipos y cenénquima de varias especies de gorgonias, en este caso sobre* Eunicella verrucosa

5. Un molusco opistobranquio del género Tritonia *se alimenta sobre las ramas de* Leptogorgia*; también sobre ellas realiza su puesta de huevos*

6. Puesta de huevos de Neosimnia spelta*, molusco que depreda los tejidos vivos de la gorgonia* Leptogorgia





METALIZAR EL

Tras un largo y laborioso proceso, en el que se han reproducido las condiciones extremas que reinan en el núcleo de Júpiter, se ha logrado convertir en metal el hidrógeno

William J. Nellis

En el Laboratorio Nacional Lawrence de Livermore hay un cañón de doble etapa, cargado de gas hidrógeno con la fuerza explosiva de diez cartuchos de dinamita. Es capaz de disparar proyectiles a siete kilómetros por segundo, más de 20 veces la velocidad del sonido y unas 15 veces la de la bala más veloz. Pero no se trata de ningún arma, sino de un potente instrumento cuya longitud iguala a la de dos autobuses urbanos y cuyo blanco no son más que unas pocas gotas de líquido.

Por supuesto, no nos hallamos ante ningún líquido ordinario, aunque contenga el elemento más común del universo. Pese a su sencilla estructura atómica —un solo protón y un solo electrón—, el hidrógeno ha demostrado ser mucho más complejo de lo que se había imaginado. En condiciones normales, es un gas de moléculas diatómicas, susceptible de convertirse en líquido a temperaturas inferiores a 20 kelvin y en sólido a menos de 14 kelvin. En todos los estados indicados, el hidrógeno se comporta como aislante eléctrico. Pero ya en los años treinta se pronosticó que al someterle a una extrema presión, su molécula se disociaría en átomos separados y la sustancia se convertiría en un metal conductor.

En los sesenta, Neil W. Ashcroft, de la Universidad de Cornell, sostuvo que el hidrógeno metálico sólido actuaría como conductor eléctrico de resistencia nula. Si se consiguiera mantener su carácter metálico en condiciones normales, podría utilizarse como superconductor a temperatura ambiente, hallazgo que persiguen afanosamente los científicos desde hace tiempo. También podría valer como fuente compacta de energía o material de construcción ligero.

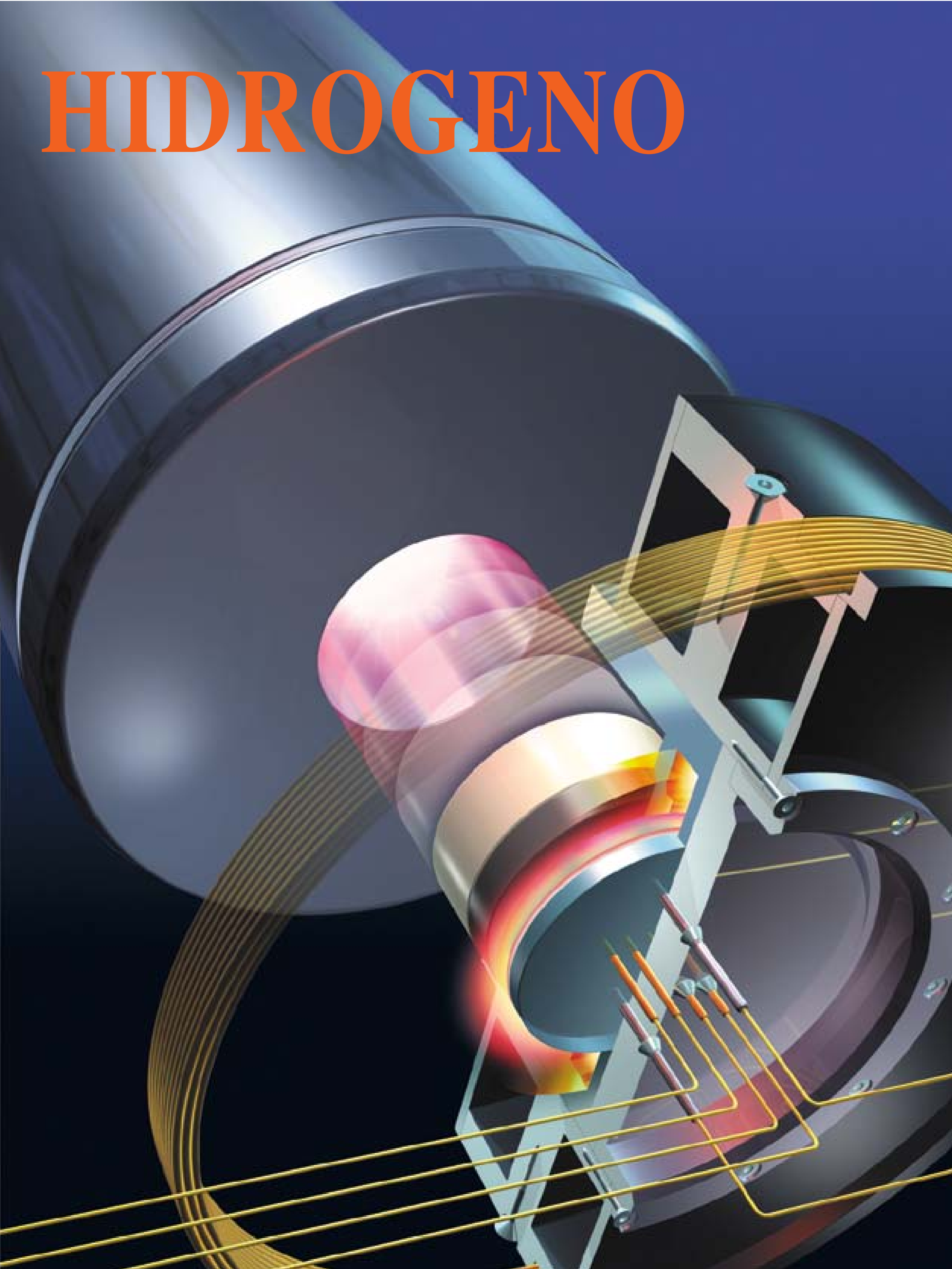
Nuestro grupo ha dado un paso firme hacia ese objetivo. Mediante el cañón de gas de Livermore hemos logrado comprimir el hidrógeno líquido hasta el punto de convertirlo en metal líquido. Se mantuvo como tal menos de un microsegundo, pero fue suficiente para determinar y medir la conductividad eléctrica del nuevo material. Aunque todavía no se ha alcanzado la meta de crear hidrógeno metálico sólido, los resultados obtenidos nos permiten vislumbrar el comportamiento del hidrógeno a diversas temperaturas y a presiones ultraelevadas. Este conocimiento nos ayudaría a elaborar procedimientos más eficaces para desencadenar reacciones de fusión destinadas a la producción de energía. También puede aportar progresos a nuestras ideas sobre la composición interna de Júpiter, cuya enorme masa es capaz de comprimir hasta forma metálica el hidrógeno que fluye en el interior del gigante gaseoso.

Al final del siglo XIX hubo quien postulaba que el hidrógeno se tornaría metálico al condensarse. Después de todo, reside en la primera columna de la tabla periódica, junto con los metales alcalinos. En 1898, James Dewar licuefactó hidrógeno y lo solidificó un año después. Para sorpresa de muchos, ambas fases condensadas resultaron ser aislantes: los átomos de hidrógeno seguían ligados en moléculas diatómicas y se comportaban como los halógenos de la columna séptima de la tabla, cloro y flúor, por ejemplo.

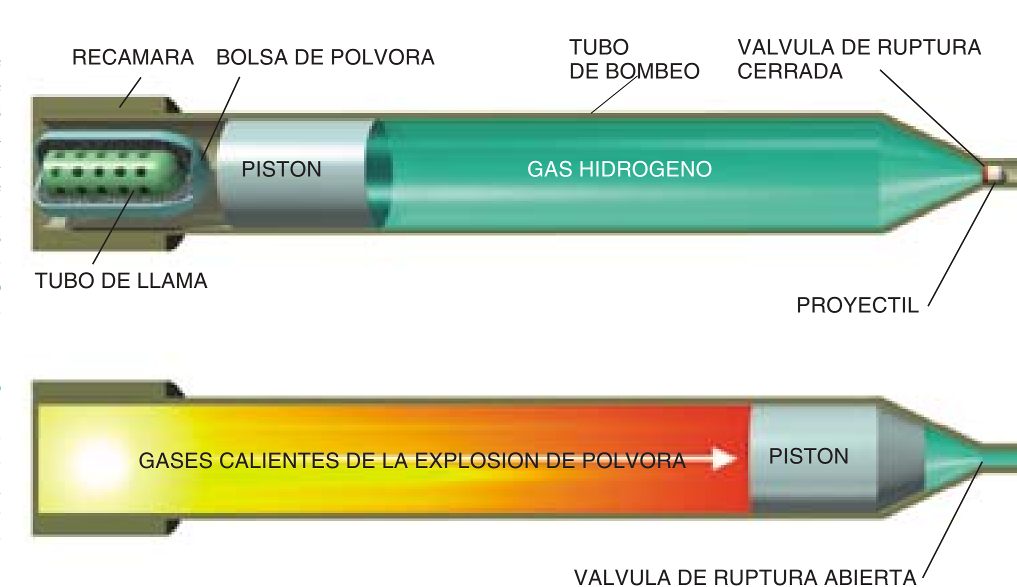
Con la mecánica cuántica —la física a escala atómica— el análisis del hidrógeno recibió un vigoroso impulso. En 1935, Eugene P. Wigner, de la Universidad de Princeton, predijo que el aislante sólido de molécula diatómica se transformaría en un sólido metálico monoatómico si se le sometiera a una presión suficiente. Al correr de los años, las estimaciones teóricas de la presión requerida han variado desde 25 a 2000 gigapascal, o desde 250.000 hasta 20 millones de veces la presión atmosférica al nivel del mar. Según los cálcu-

WILLIAM J. NELLIS, investigador del Laboratorio Lawrence en Livermore, se doctoró en física por la Universidad de Iowa en 1968. Su trabajo se centra en el estudio de materiales sometidos a compresión por choque, midiendo su conductividad eléctrica, temperatura, datos de la ecuación de estado, perfiles de la onda de choque y transiciones de fase en líquidos y sólidos.

1. UN BRUSCO IMPACTO crea la presión de choque necesaria para comprimir a estado metálico una muestra de hidrógeno líquido. Un cañón de gas (*arriba*) acelera un proyectil —un disco metálico del tamaño de una moneda sobre soporte de plástico— hasta velocidades de siete kilómetros por segundo. Cuando el proyectil golpea la cápsula portamuestras (*vista en corte, abajo*), crea una onda de choque en la fina capa de hidrógeno líquido (*amarillo*). La onda reverbera entre dos placas duras de zafiro (*azul*), sometiendo el hidrógeno a presiones de hasta 180 gigapascal. Hay unos terminales (*púrpura*) que activan el equipo registrador; los electrodos (*naranja*) miden la conductividad del hidrógeno para determinar cuándo cambia al estado metálico.


HIDROGENO

2. **EL CAÑON DE GAS de doble etapa consta de recámara, tubo de bombeo y un cañón de disparo más estrecho. La recámara contiene hasta 3,3 kilogramos de pólvora, parte en un tubo de llama perforado y parte en una bolsa que lo rodea (*arriba*). Cuando se prende la pólvora, los gases calientes de la explosión empujan un pistón a lo largo del tubo de bombeo (*abajo*). El pistón comprime el gas hidrógeno a su paso; el gas rompe una válvula y penetra en el tubo de disparo lanzando un proyectil hacia la cámara objetivo. El proyectil —un disco metálico impactor embutido en un cilindro de plástico— golpea el portamuestras de aluminio que encierra el hidrógeno líquido a metalizar (*extremo de la derecha*).**



los más recientes, el hidrógeno molecular sólido podría metalizarse al sobrepasar los 400 gigapascal, es decir, unos cuatro millones de atmósferas. Nuevas mediciones por rayos X indican, sin embargo, que la presión de transición de estado podría elevarse hasta 620 gigapascal.

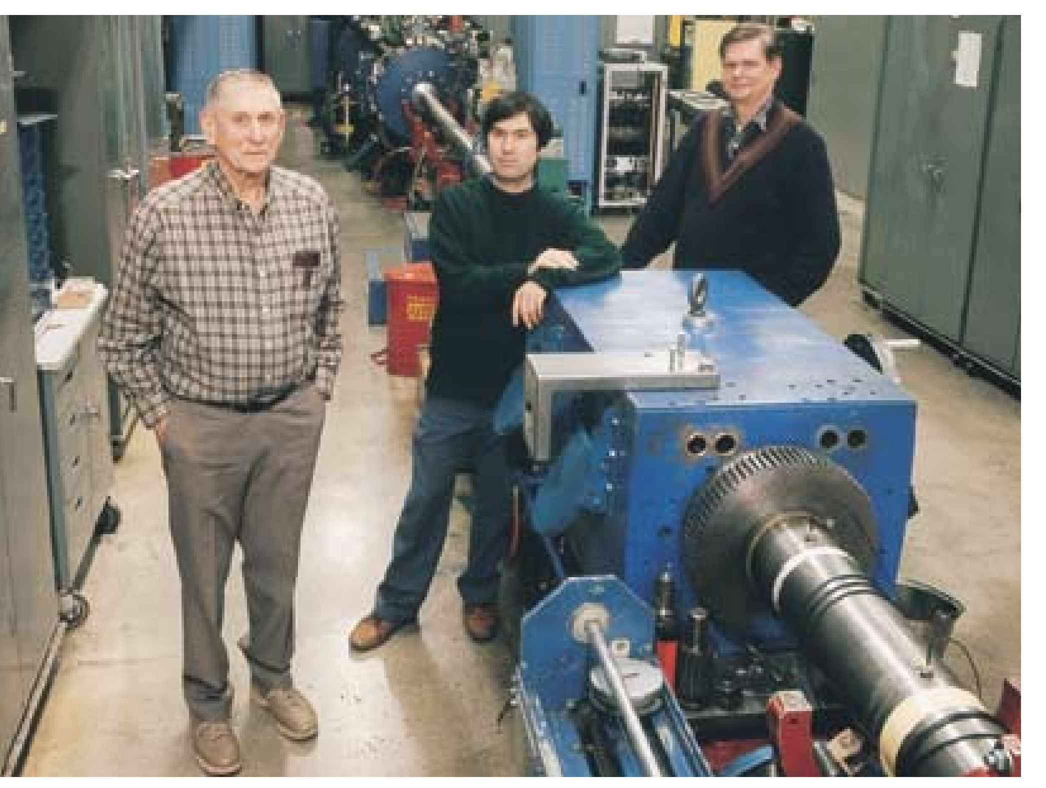
Una manera de conseguir una presión tan ingente —más o menos la que reina en el centro de la Tierra— consiste en estrujar la muestra entre dos superficies extremadamente duras. Este método se aplica en la celdilla de yunque de diamante. Con tales medios se han conseguido presiones de hasta 500 gigapascal.

Trabajando con este dispositivo, Russell J. Hemley y Ho-kwang Mao, de la Institución Carnegie, Isaac F. Silvera, de la Universidad de Harvard, y Arthur L. Ruoff, de Cornell, han intentado metalizar hidrógeno bajo presiones de hasta 340 gigapascal. Aunque el hidrógeno se solidificó, permitiendo mediciones espectroscópicas y por difracción de rayos X, no pudo determinarse directamente la conductividad del material porque la excesiva presión había quebrado los terminales eléctricos de la celdilla de yunque de diamante. Tampoco fue posible metalizar el hidrógeno líquido en dicha célula debido a la rápida difusión del fluido a través de las paredes del dispositivo.

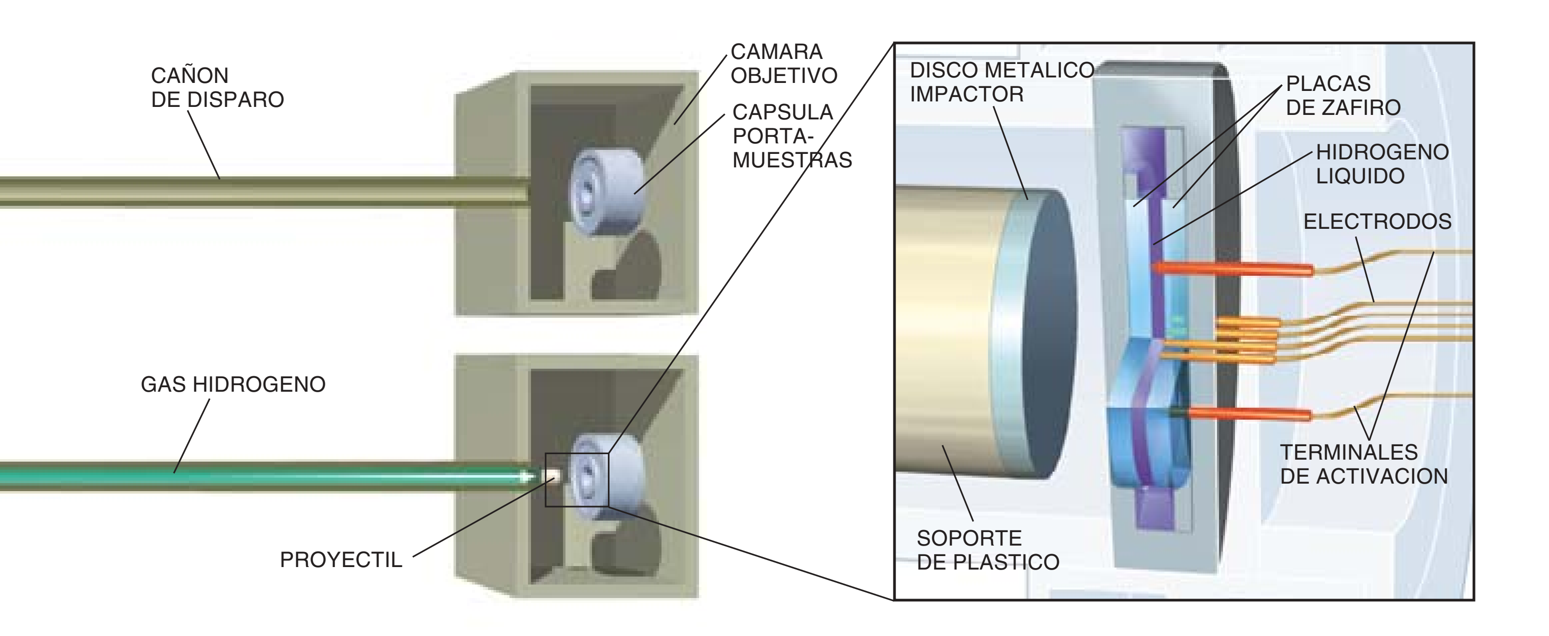
Cañoneo del hidrógeno

El uso de cañones de gas se inició diez años atrás, a poco de descubrirse los superconductores de altas temperaturas. Estos materiales, semejantes a las cerámicas, conducen la electricidad sin resistencia a temperaturas cercanas al punto de ebullición del nitrógeno (alrededor de 77 kelvin), muy superiores a las que requieren los superconductores clásicos (próximas a la ebullición del helio, o sea, cuatro kelvin). A principios de los noventa comencé a investigar tales sustancias, utilizando cañones de gas diseñados por General Motors en los años sesenta para la prueba de misiles. Los había de gran tamaño, que aceleraban misiles y así simulaban los efectos del regreso a la atmósfera; el laboratorio de Livermore adquirió otro tipo menor, empleado en investigaciones tácticas porque permite someter los materiales a condiciones extremas.

Sabiendo las presiones que podía crear este cañón, pensamos que podría valer para estudiar la conductividad del hidrógeno fluido. A pre-



3. **TRIO INVESTIGADOR de altas presiones en torno al cañón de gas utilizado para metalizar el hidrógeno líquido en el Laboratorio Nacional Lawrence en Livermore. De izquierda a derecha, Arthur C. Mitchell, Samuel T. Weir y William J. Nellis.**



siones muy altas, del orden de 100 gigapascal, la temperatura de fusión del hidrógeno aumenta hasta los 1500 kelvin. Por tanto, hay que calentar el fluido para evitar que se solidifique. Un procedimiento ideal para comprimir y calentar a la vez el hidrógeno es la onda de choque. Se trata del conocido estampido que provocan los aviones al cruzar la barrera del sonido, un cambio brusco de presión que obliga a las moléculas a apiñarse con suma rapidez, elevando así su temperatura. En 1991, Samuel T. Weir, Arthur C. Mitchell y yo empezamos a utilizar el cañón de gas para producir una onda de choque que reverbera en el hidrógeno líquido.

El primer módulo del cañón es una recámara que contiene hasta 3,3 kilogramos de pólvora. Cuando ésta explota, lanza un pistón de hasta 6,8 kilogramos por un tubo de bombeo de 10 metros de longitud y 90 milímetros de diámetro. Dentro del tubo hay sesenta gramos de gas hidrógeno (que no debe confundirse con el hidrógeno que se va a metalizar). El pesado pistón oprime el hidrógeno que encuentra a su paso y le hace alcanzar una presión cercana a 0,1 gigapascal; en ese momento el gas rompe una válvula y penetra en la segunda etapa del cañón, un tubo más estrecho de nueve metros de longitud y 28 milímetros de diámetro en el que se ha hecho el vacío. Importa reducir la sección del tubo para acelerar la salida del gas.

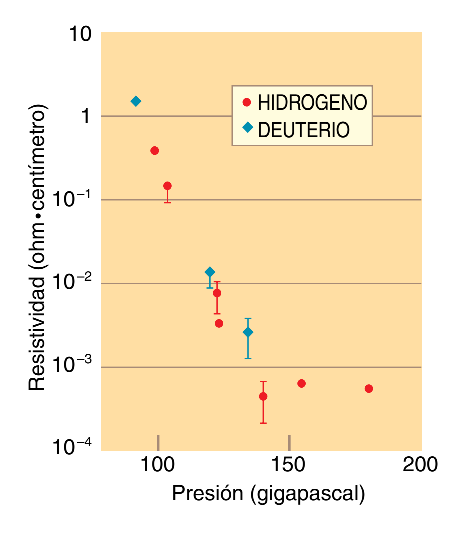
Una vez cruzada la válvula, el gas impulsa un proyectil terminado en un disco metálico o impactor. (El hidrógeno acelera más el proyectil por ser el gas con menor peso molecular y mayor velocidad de propagación del sonido.) El impactor de 20 gramos recorre el estrecho cañón, y alcanza velocidades de hasta unos siete kilómetros por segundo o 25.000 kilómetros por hora. Al final del cañón impacta en una cápsula portamuestras de aluminio que encierra una capa de hidrógeno líquido de 0,5 milímetros de espesor, intercalada entre dos placas de zafiro duras. El fluido se ha enfriado a 20 kelvin para conseguir una alta densidad inicial.

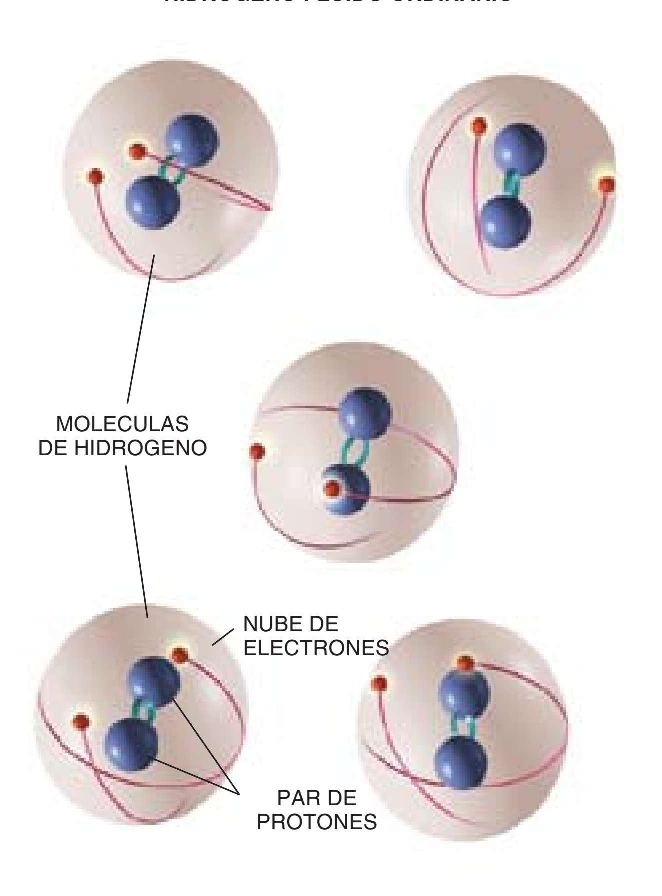
La percusión genera una intensa onda de choque que atraviesa la cápsula de aluminio e incide en el hidrógeno líquido. La onda de choque se refleja en las placas de zafiro, sufriendo más de diez reverberaciones de una a otra. Este proceso crea presiones de choque sobre el hidrógeno que llegan a 180 gigapascal, reduciendo el fluido a la décima parte de su volumen original y elevando a 3000 kelvin su temperatura. La reverberación y la presión acumulada de las ondas de choque son las claves del éxito del experimento; si sobre el hidrógeno actuara una sola onda de choque con idéntica presión, la temperatura del líquido crecería mucho más de lo debido.

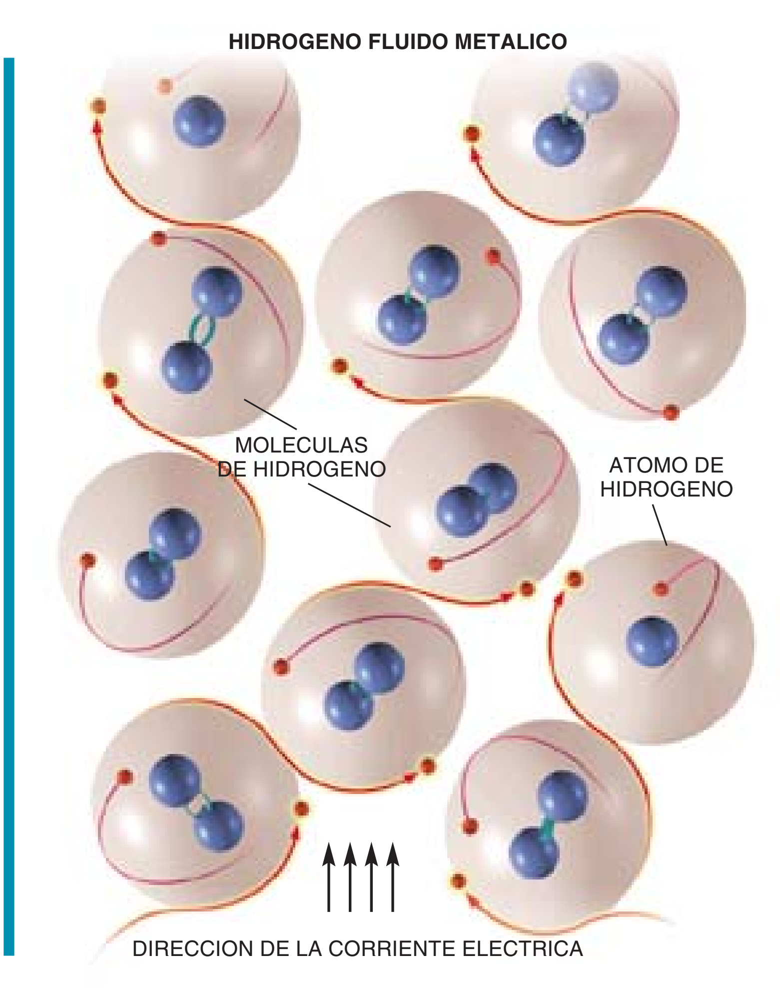
Un terminal de la cápsula de aluminio activa el equipo registrador en cuanto detecta que la primera onda de choque ha penetrado en el hidrógeno. Aunque la muestra sólo está sometida a la presión máxima durante unos 100 nanosegundos (la décima parte de un microsegundo), basta ese instante para que el hidrógeno alcance su equilibrio térmico y puedan hacerse mediciones. Afortunadamente, la breve duración del experimento no da tiempo a que el hidrógeno pueda difundirse al exterior de la cápsula ni reaccionar químicamente con ella.

El ensayo no carecía de riesgos. Hubo que tomar precauciones para asegurar que el gas hidrógeno del cañón no se mezclara con el oxígeno en la cámara objetivo. Si todo ese hidrógeno reaccionara con el oxígeno, la energía liberada equivaldría a la explosión de dos kilogramos de TNT. Por tanto, nos cercioramos de que la cámara objetivo podía resistir im-

4. LOS RESULTADOS de los experimentos con el cañón de gas demuestran que la resistividad del hidrógeno líquido desciende —y por tanto su conductividad crece— cuando se aumenta la presión ejercida sobre la muestra. A presiones de 93 a 120 gigapascal, el hidrógeno líquido es semiconductor, pero a 140 gigapascal la resistividad cae a 0,0005 ohm·centímetro y el hidrógeno pasa a ser metálico. Para el deuterio, isótopo del hidrógeno, los resultados siguen la misma pauta.







5. LAS MOLECULAS están bien separadas en el hidrógeno líquido ordinario (*izquierda*); los electrones —representados como nubes de carga negativa— permanecen próximos a los pares de protones. Mas la alta presión apretuja tanto las moléculas, que los electrones saltan de una molécula a la contigua, creando así una corriente cuando se aplica al líquido una tensión eléctrica (*derecha*). La presión escinde en átomos el 10 por ciento de las moléculas.

pactos de restos procedentes del choque, ya que una cámara perforada dejaría entrar aire (y oxígeno). En el diseño del experimento se cuidó de que nunca se filtrara aire al interior en cantidad suficiente para desencadenar una explosión. Todas las tensiones utilizadas para diagnóstico en la cámara objetivo se desconectaban inmediatamente después de disparar el cañón, con el fin de eliminar chispas que pudieran inflamar el hidrógeno. Además, tras el disparo se inyectaba gas nitrógeno en la cámara para mantener inerte el hidrógeno. Y por último, nadie podía entrar en la sala mientras se disparaba el cañón.

Nuestro descubrimiento del hidrógeno metálico fue una afortunada casualidad: esperábamos ver cómo el hidrógeno líquido se aproximaba al estado metálico, no que llegara a alcanzarlo. Para determinar la conductividad del hidrógeno líquido, enviamos una pequeña corriente a los electrodos de la cápsula portamuestras que nos permitió medir la resistividad eléctrica (como es sabido, la resistencia eléctrica de un conductor es igual a la resistividad multiplicada por la longitud y dividida por la sección transversal de ese conductor). Vimos así que, a una presión de 93 gigapascal, la resistividad del hidrógeno líquido era del orden de un ohm·centímetro, y que, al aumentar la presión a 120 gigapascal, la resistividad disminuía hasta 0,005 ohm·centímetro. Estos valores corresponden a un estado semiconductor: resistividades menores que las de los aislantes típicos, aunque mayores que las de los conductores metálicos.

Pero al elevar la presión hasta 140 gigapascal, encontramos que la resistividad del hidrógeno líquido descendía hasta unos 0,0005 ohm·centímetro, lo que indicaba un estado metálico plenamente conductor. Y la resistividad se mantuvo en ese nivel, pese a seguir aumentando la presión (hasta 180 gigapascal). Me sorprendieron tanto estos resultados, que no los di a conocer. Dejé transcurrir un año en comprobaciones hasta que comprendí por qué permanecía constante la resistividad, aunque la presión creciera.

A escala atómica, parte de los electrones del hidrógeno se liberan de sus moléculas durante la metalización. A bajas presiones, dos átomos de hidrógeno sienten una tendencia intensísima a formar una molécula; por eso, el hidrógeno líquido contiene sólo moléculas. Cada molécula consta de un par de protones rodeados por una nube de carga negativa. Puesto que se requiere cierta energía —unos 15 electronvolt— para quitarle un electrón a la molécula de hidrógeno, el fluido de hidrógeno molecular no puede conducir corriente: es un aislante eléctrico.

La situación cambia, sin embargo, cuando las moléculas de hidrógeno se apiñan y calientan por el efecto de reverberación de la onda de choque. El intervalo de movilidad electrónica —la energía requerida para desprender un electrón de la molécula de manera que pueda conducir una carga

eléctrica— disminuye al agruparse más las moléculas. Y por si fuera poco, la energía para detraer electrones la proporciona el calentamiento resultante del choque. En tal estado, el hidrógeno fluido es semiconductor: su conductividad eléctrica crece (y su resistividad disminuye) de manera estable a medida que aumentan la densidad y la temperatura.

Cuando la presión del choque alcanza los 140 gigapascal, la densidad del hidrógeno líquido llega a 0,32 mol por centímetro cúbico, la temperatura sube hasta 2600 kelvin y el intervalo de movilidad electrónica cae hasta sólo 0,22 electronvolt. A esta densidad, las moléculas de hidrógeno están tan próximas entre sí, que sus nubes de carga negativa se superponen; entonces, los electrones pueden saltar libremente de una molécula a la contigua. Los electrones ya son móviles; los posteriores aumentos de densidad no acentúan más este carácter, lo que explica que la resistividad del hidrógeno no siga disminuyendo al elevar la presión.

Por añadidura, en estas condiciones cerca del 10 por ciento de las moléculas de hidrógeno se escinden en átomos. El hidrógeno fluido se convierte en una compleja mezcla de moléculas, átomos y probablemente agrupaciones de orden superior. El choque entre moléculas provoca incesantes escisiones en átomos, que terminarán por recombinarse para formar nuevas moléculas. Dado el desorden del fluido, los electrones de conducción se dispersan por cada molécula. A ese estado se le denomina conductividad mínima de un metal desordenado.

Para metalizar el hidrógeno en estado sólido se requiere una presión mayor que la necesaria en estado fluido. Probablemente ello se debe a que los átomos de hidrógeno, al solidificarse, se fijan en una estructura cristalina, lo que aumenta el intervalo de energía electrónico y detiene la metalización. En los líquidos no existe tal estructura.

Los datos sobre conductividad eléctrica y comportamiento del hidrógeno a presiones y temperaturas ultraelevadas han sido muy esclarecedores. En particular, para elaborar modelos del interior de Júpiter y de Saturno. Estos gigantescos astros totalizan una masa 400 veces mayor que la de la Tierra. Gran parte de su hidrógeno existe en estado fluido metálico, que produce los campos magnéticos de estos planetas por una acción convectiva de dínamo.

Múltiples aplicaciones del hidrógeno metálico

En nuestros experimentos el hidrógeno líquido permanecía en estado metálico menos de un microsegundo. Si fuéramos capaces de crear hidrógeno metálico sólido y mantenerlo en ese estado en condiciones normales de presión y temperatura, los beneficios potenciales para la ciencia y la técnica serían enormes. Pero como no sabemos de qué manera —ni siquiera si ello es posible— el hidrógeno metálico podría perdurar en condiciones ambientales, todo lo que sigue es pura especulación. En general, una sustancia tal probablemente tendría unas propiedades eléctricas, magnéticas, ópticas, térmicas y mecánicas muy singulares. Se señalan aquí algunas de las posibles aplicaciones del hidrógeno metálico sólido.

Superconductor a temperatura ambiente

Algunos físicos han predicho que el hidrógeno metálico sólido podría conducir la electricidad con resistencia nula a temperatura ambiente. Un superconductor así revolucionaría numerosos aspectos de la vida moderna: las líneas de transmisión no perderían energía, los ordenadores serían más rápidos, los trenes levitarían sobre almohadillas magnéticas y los campos magnéticos podrían almacenar enormes cantidades de energía sin pérdidas apreciables. Los mejores superconductores de alta temperatura existentes funcionan a unos 150 kelvin y deben ser enfriados con nitrógeno líquido, lo que impide su uso práctico en la vida cotidiana.

Estructuras ligeras

Podría conseguirse hidrógeno metálico resistente y estable mediante la incorporación de aditivos que se unan a las moléculas y átomos de hidrógeno sometidos a presiones ultraelevadas. La presión y la temperatura se harían descender súbitamente. Esta rápida extinción originaría un vidrio metálico, tal vez semejante al vidrio metálico de paladio que hoy se produce con boro y fósforo como aditivos. La densidad del hidrógeno metálico sólido podría equipararse a la que posee en estado líquido, es decir, unos 0,7 gramos por centímetro cúbico, o cercana a la densidad del agua. Sería tres veces más ligero que el aluminio y unas diez veces más ligero que el hierro. No es posible, empero, predecir su resistencia. En las hipótesis más optimistas, el hidrógeno metálico sólido podría utilizarse para fabricar automóviles de muy poco peso, que obtendrían un rendimiento del combustible mucho mejor que los vehículos al uso.

Combustible limpio

Debido a su densidad, el hidrógeno metálico sólido podría almacenar gran cantidad de energía y liberarla cuando el sólido regresara a la fase gaseosa. No podemos estimar el rendimiento de tal proceso, pero sí sabemos que el producto primario de esa reacción sería el gas hidrógeno, por lo que el combustible de hidrógeno sólido resultaría inocuo para el entorno, en el supuesto de que los aditivos requeridos para sintetizarlo también lo fueran. Si pudiera liberarse la energía con relativa lentitud, el hidrógeno metálico sólido podría reemplazar a la gasolina y otros combustibles para el transporte. Y si la liberación de energía fuera algo más rápida, serviría como agente propulsor: podría conseguirse una impulsión por kilogramo cinco veces mayor que la del combustible líquido de hidrógeno-oxígeno quemado en el lanzamiento de cohetes. Una liberación celerísima de la energía almacenada permitiría emplear como explosivo el hidrógeno metálico sólido.

Pastillas de fusión

El hidrógeno en sus isótopos deuterio y tritio (DT) actúa como combustible en la fusión por confinamiento inercial. Esta sustancia se calienta y comprime mediante unos potentes láseres, instando la fusión de los núcleos. Una pastilla de combustible compuesta de hidrógeno metálico sólido produciría una energía de fusión mucho mayor que otras formas de DT, no por ser metálica sino por su elevada densidad. Utilizando el DT metálico, podría alojarse bastante más combustible en una determinada cavidad objetivo que si ésta se rellenara con sólidos moleculares criogénicos. Además, la alta densidad inicial de la pastilla DT metálica mejoraría sensiblemente el rendimiento del proceso.

MODELO ANTIGUO

HIDROGENO FLUIDO AISLANTE

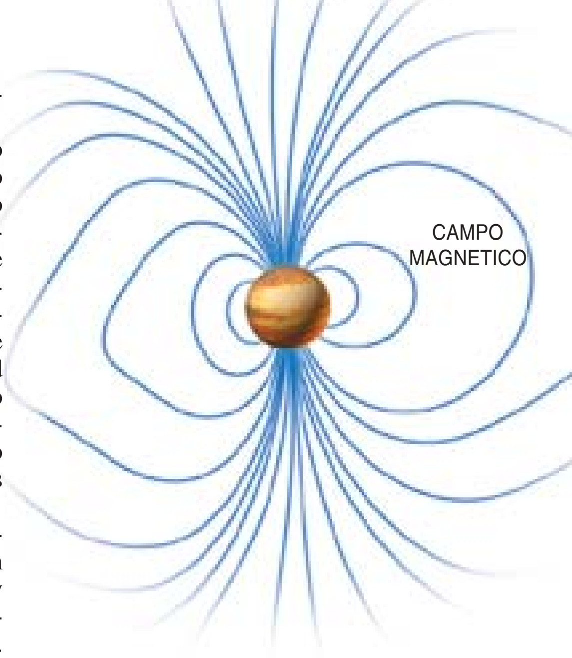
HIDROGENO FLUIDO METALICO

MODELO NUEVO

LAS MOLECULAS DE HIDROGENO COMIENZAN A DISOCIARSE

EL HIDROGENO SE HACE METALICO

EL HIDROGENO SE HACE TOTALMENTE MONOATOMICO



6. EL INTERIOR DE JUPITER consta, en buena medida, de hidrógeno fluido. La teoría anterior sostenía que el hidrógeno se metalizaba en ese planeta a 18.000 kilómetros de profundidad, punto en el que la presión disgregaba todas las moléculas en átomos (*izquierda*). Sin embargo, los experimentos de Livermore sugieren que la transición al estado atómico es gradual y que el hidrógeno se hace metálico a sólo 7000 kilómetros de profundidad (*derecha*). Este nuevo modelo explicaría el intenso campo magnético de Júpiter (*abajo, derecha*).

Júpiter en botella

Con anterioridad a nuestros ensayos, se sostenía la teoría de que Júpiter, tras su espeso velo de nubes, estaba formado por un manto de hidrógeno líquido eléctricamente aislante, que cubre una cuarta parte del radio del planeta (unos 18.000 kilómetros de profundidad), y un núcleo de hidrógeno líquido metálico. Según este modelo, existe una definida divisoria entre el manto y el núcleo; a esa profundidad, la presión gravitatoria (cerca de 300 gigapascal) transforma el hidrógeno de fluido aislante diatómico en fluido metálico monoatómico. Pero los resultados obtenidos en nuestro laboratorio indican, por contra, que hay una transición continua de hidrógeno molecular a monoatómico en el fluido. No parece, pues, verosímil que persista una frontera definida entre el manto y el núcleo de Júpiter. Lo más probable es que el hidrógeno molecular empiece a disociarse a una presión cercana a los 40 gigapascal, para escindirse por completo a 300 gigapascal. La conductividad eléctrica alcanza el nivel mínimo para un metal a 4000 kelvin y 140 gigapascal, presión que se encontraría a sólo 7000 kilómetros de profundidad.

Según esto, el origen del campo magnético de Júpiter se halla mucho más próximo a la superficie de lo que se había pensado. Así se explicaría por qué es relativamente grande el campo en la superficie del planeta: alrededor de 10 gauss. En cambio el campo magnético terrestre se origina a mucha mayor profundidad —en el núcleo de hierro, que sólo llega a la mitad del radio de la Tierra—, y por ello los valores del campo en la superficie solamente rondan los 0,5 gauss.

También interesa conocer el comportamiento del hidrógeno fluido en un amplio margen de temperaturas y presiones para el desarrollo de la fusión por confinamiento inercial (FCI). La técnica FCI consiste en colocar una pastilla de combustible compuesta por los isótopos deuterio y tritio del hidrógeno en una cavidad de vacío e irradiarla allí con pulsos de láser de alta intensidad, escalonados en el tiempo. El primer pulso de láser produce una onda de choque del orden de 100 gigapascal; los pulsos sucesivos actúan como las reverberaciones de la onda de choque en nues-

tra prueba. Si los investigadores de la FCI conocen cómo reacciona el hidrógeno a estas presiones podrán determinar la mejor manera de administrar los pulsos del láser.

Nuestros experimentos todavía están lejos de hacer realidad una de las hipótesis más interesantes: que el hidrógeno metálico sólido, una vez obtenido, pueda permanecer en ese estado, aun a temperatura y presión ambiente. Tal vez sea posible comprimir muy intensamente el hidrógeno, y después relajar bruscamente la presión de tal manera que mantenga sus propiedades metálicas como sólido, a imagen del carbono, que se comprime hasta formar un diamante y retiene su estructura cristalina tras eliminar la presión. Un material de este género encontraría innumerables aplicaciones.

La tarea será en todo caso ardua, dado que el hidrógeno presenta unas intensas fuerzas de van der Waals, es decir, fuerzas que separan las moléculas en cuanto se libera la presión externa. Probablemente se necesitan aditivos que liguen entre sí moléculas y átomos de hidrógeno sometidos a presión y que los retengan luego en su posición, una vez que la presión desaparezca. Lo ideal serían aditivos que no alterasen las ventajosas propiedades del hidrógeno metálico.

Los experimentos futuros con el cañón de gas podrían indicar la manera de conseguirlo. Pero aun cuando no fuera así, estamos seguros de poder saber más sobre las singulares características del hidrógeno sometido a presiones extremas. No podemos resistir la fascinación por una sustancia que es, a un tiempo, el elemento más sencillo del universo y uno de los más complejos.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

DENSE HYDROGEN: THE RELUCTANT ALKALI. N. Ashcroft en *Physics World*, vol. 8, n.º 7, págs. 43-48; julio de 1995.

METALLIZATION OF FLUID MOLECULAR HYDROGEN AT 140 GPA (1.4 MBAR). S. T. Weir, A. C. Mitchell y W. J. Nellis en *Physical Review Letters*, vol. 76, n.º 11, págs. 1860-1863; 11 de marzo de 1996.

SOLID HYDROGEN AT 342 GPA: NO EVIDENCE FOR AN ALKALI METAL. Chandrabhas Narayana, Huan Lou, Jon Orloff y Arthur L. Ruoff en *Nature*, vol. 393, págs. 46-49; 7 de mayo de 1998.

La plata del Perú

Entre 1590 y 1600 Potosí produjo más del 40 por ciento de la plata mundial. Una red de lagunas y de abastecimiento de agua, construida por los españoles, proporcionó la energía hidráulica necesaria para el tratamiento de los minerales argénteos

Alain Gioda y Carlos Serrano

Perú fue El Dorado, el país legendario que buscaban los conquistadores. Allí los colonizadores amasaban una fortuna en pocas semanas. Al comienzo de la explotación del yacimiento de Potosí, en 1545, los filones de plata pura afloraban en la cima del Cerro Rico, la montaña de plata, y los nobles españoles sólo tenían que agacharse para enriquecerse en este emporio argentífero. Evidentemente, dejaban para los indios el trabajo de explotación, transporte del mineral, su beneficio y fundición.

En menos de 30 años, el pequeño asiento minero de Potosí se transformó en una ciudad riquísima de 120.000 habitantes. La población aumentó hasta 160.000 entre 1611 y 1650. Era entonces la mayor ciudad de las Américas, que rivalizaba en tamaño y opulencia con las capitales europeas. La producción de plata llegó a las 200 toneladas en 1593; la moneda de plata española acuñada en el lugar fue durante dos siglos el equivalente del dólar norteamericano actual en las transacciones comerciales de Occidente.

Hoy en día Potosí cuenta con unos 130.000 habitantes. Edificada a 3980 metros de altura en las laderas del Cerro Rico (4890 m), el clima es frío y árido con 142 días de helada, una temperatura media de 9 ºC y 400 milímetros de lluvia al año. Este legado de la colonización española fue catalogado patrimonio de la humanidad por la UNESCO a finales de 1987.

Estudiando los archivos de los colonos españoles y administradores locales, hemos recreado la grandeza y la decadencia de las minas de Potosí, a través de las adaptaciones de la extracción a las anomalías climáticas y los ciclo económicos, a la disminución progresiva de la ley del mineral de cabeza y a los cambios de organización social.

Desde 1573 hasta 1650, tres factores aseguran la edad de oro, o mejor, la edad de plata, de Potosí: la utilización de un proceso de tratamiento de la plata inventado en 1555 en México, un régimen de trabajos forzados (la "mita") impuesto a los indios (abolido en 1812) y una energía hidráulica abundante utilizada hasta 1872, fecha de la introducción de la electricidad y del vapor que alimentaran a las instalaciones de tratamiento de minerales.

ALAIN GIODA y CARLOS SERRANO son estudiosos del medio andino. Gioda, experto en historia del clima, se halla adscrito al Instituto de Investigación para el Desarrollo. Serrano, docente y director del posgrado hasta 1998 en la Universidad Autónoma Tomás Frías, es miembro de la Comisión Internacional de Historia de las Ciencias Geológicas.

Fin del mineral de alta ley y construcción de las lagunas

Durante la docena de años gloriosos que siguen al descubrimiento de las minas, el mineral de plata se extrajo a cielo abierto de los filones de plata casi pura —cinco vetas de 1 a 4 metros de espesor—, que afloran en la cima de la montaña. Cuando en 1556 se agotaron los grandes filones de la cima, comenzó la explotación mediante socavones y galerías subterráneas. Hacia 1650, se excavaron pozos o cuadros, llegando a alcanzar los 600 metros de profundidad, sin ayuda de explosivos. Al final del siglo XIX, se conocían más de 300 socavones o bocaminas.

Hacia 1566, al final del primer momento de esplendor minero, la producción inicia su declive. El virrey Francisco Toledo, administrador de las Indias de 1569 a 1581, se dirige a Potosí en 1572. Allí reúne a un grupo de mineros para presentar un nuevo método de beneficio o tratamiento de la plata en los minerales menos ricos, método que necesitaba la construcción de ingenios hidráulicos. Cuatro empresarios proponen entonces construir, a su costa, unas lagunas para recuperar el agua de lluvia y almacenarla (la estación de las precipitaciones sólo duraba tres meses, de diciembre a febrero).

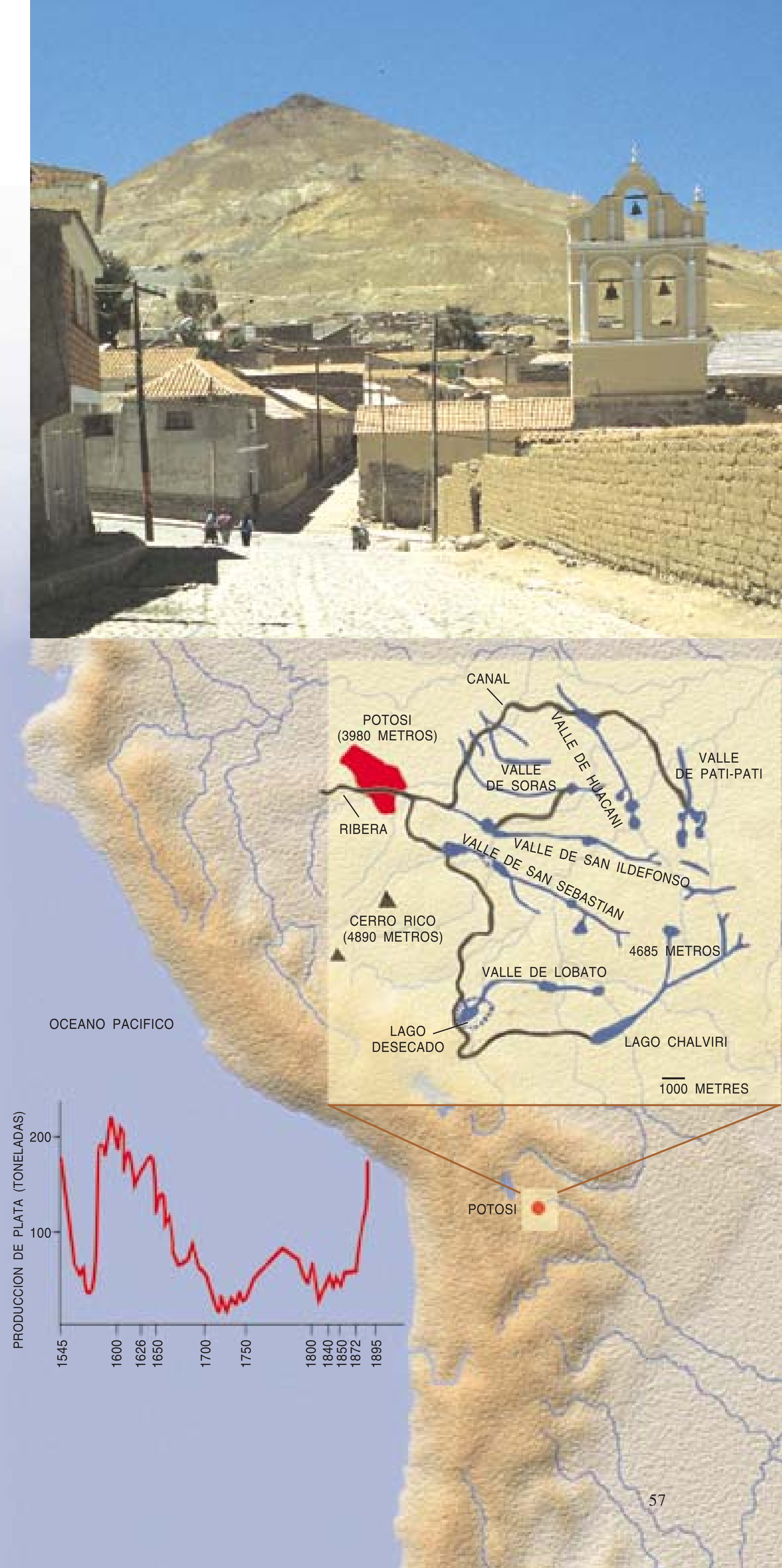
Se proponían sacar partido de la topografía de la región y engarzar todas las lagunas artificiales en una vasta red para alimentar los ingenios. La construcción de los embalses comenzó en 1573 con el de la laguna Chalviri. Cincuenta años más tarde, unas dieciocho lagunas reunían un volumen total de cinco millones de metros cúbicos de agua. Repartidas en seis quebradas que cubren 65 kilómetros cuadrados, las represas colectan la totalidad de las aguas en una cuenca natural de aproximadamente 20 kilómetros cuadrados que reúne el desagüe intermitente de los pequeños valles de San Ildefonso y de San Sebastián. La alimentación regular de energía hidráulica asegura el apogeo de las minas coloniales de Potosí entre 1573 y 1650: se trata del segundo momento de esplendor minero.

En esta época, los ingenieros españoles sacan provecho de dos tipos de lagunas naturales: las glaciares y las bloqueadas por acumulación de morrenas. Cuando la roca taponaba

el desagüe, los españoles liberaban el agua del lago natural perforando un túnel en la parte rocosa que cerraba el valle glaciar. Se reforzaron los diques naturales constituidos por morrenas más o menos herméticas, según el grado de erosión. Los españoles construyen así grandes diques para las lagunas Huacani y Chalviri; y luego, hacia 1576, otras represas cercanas a Potosí, como las de San Sebastián y de San Ildefonso. Los trabajos de las lagunas y sus diques terminaron en 1621.

Durante este período, la producción de plata aumentó proporcionalmente al caudal de agua utilizable, hasta que el bajón de la ley disminuye la rentabilidad e impone la construcción de nuevas lagunas para tratar cada vez mayores tonelajes de mineral. Por desgracia, pese a los esfuerzos de los ingenieros, la producción de plata durante la colonia no encontrará jamás sus niveles de comienzos del siglo XVII.

Antes de la construcción de los embalses, los ingenios se instalaron a unos diez kilómetros de Potosí, en el río Cayara. Para evitar el transporte demasiado largo del mineral, los españoles levantaron diques más cercanos a la ciudad y excavaron el canal colector de la Ribera de la Vera Cruz, que atraviesa Potosí siguiendo la madre de un río intermitente. Los trabajos del canal de la Ribera, empezados en diciembre de 1574, movilizaron a 200 soldados españoles y a 4000 obreros indios. La Ribera se inauguró en marzo de 1577, seis meses después de la conclusión de la construcción de las primeras



1. EL AFLORAMIENTO de las vetas en la cima (4890 m) de la montaña de plata, el Cerro Rico (*en segundo plano, en la fotografía superior*). Para tratar cantidades mayores de un mineral que se empobrecía, los españoles idearon un sistema de lagunas (*en azul en el recuadro*) colectando las aguas provenientes de la cordillera, que se reunían en la Ribera. Este canal atravesaba la ciudad de Potosí. Los ingenios de tratamiento del mineral alimentados por energía hidráulica se extendían alineados a lo largo del canal. Cinco períodos de intensa producción marcan la explotación de las minas de plata de Potosí: al poco del descubrimiento de las minas en 1545, entre 1573 y 1650, entre 1750 y 1800, entre 1840 y 1850 (en propiedad, una reanudación de la actividad) y entre 1872 y 1895. La producción anual de plata sobrepasó las 200 toneladas hacia 1600.

lagunas. Su caudal era del orden de 160-250 litros por segundo.

Los diques, de unos 200 metros de largo y de algunos metros de espesor, se levantaron en desfiladeros cercanos a la ciudad, donde las aguas se reunían. Las grandes lagunas miden más de un kilómetro de circunferencia y tienen una profundidad de cerca de cinco metros en su centro. La casi totalidad de las aguas de los embalses en la época colonial se recolectaba en la laguna de San Sebastián, por un sistema de pequeños canales y cascadas. Luego, el agua fluía por la Ribera, donde se había montado la mayoría de los ingenios (en unos quince kilómetros en el curso del río). A comienzos del siglo XVII, el agua de la laguna de San Ildefonso y de otras fuentes alimentaba las 286 pilas de la ciudad.

Cuando las lluvias eran abundantes durante la estación húmeda, las reservas de agua servían para la alimentación de los ingenios de tratamiento de minerales, a lo largo de seis o siete meses. Tenemos las informaciones de Luis Capoche, un español originario de Sevilla y propietario de dos ingenios, quien en 1583, en un texto dedicado al virrey de las Indias Torres y Portugal, describe las dificultades de la explotación de la plata y la instalación de unos cincuenta ingenios a lo largo de la Ribera. Las máquinas que trituraban los bloques de mineral eran accionadas por la energía de hombres y caballos; progresivamente se fue sustituyendo por energía hidráulica. Las máquinas hidráulicas se impusieron a finales del siglo XVI. En 1624, 67 ruedas hidráulicas con una potencia total de 355 kilowatt operaban en la Ribera.

El comienzo de la decadencia

Originario de Potosí, Bartolomé Arzáns (1676-1736) era maestro de escuela. En 1705 inicia la historia de la actividad de la ciudad desde su erección en 1545, crónica que proseguirá, a su muerte y hasta 1737, su hijo. Arzáns quedó muy impresionado por la rotura del dique de la laguna de San Ildefonso, ocurrida el 15 de marzo de 1626, que provocó la muerte de más de 2000 habitantes de la villa; según el piadoso Arzáns, Dios castigó la impiedad de los riquísimos habitantes de Potosí.

A pesar de que la rotura marcó su historia, la ciudad se repuso muy pronto de este episodio (algunos años después de la catástrofe había más ingenios sobre la Ribera que antes de 1626). Los rigores climáticos y epidemias, entre otras calamidades, azotaron a la urbe. Durante la segunda mitad del siglo XVII y la mayor parte del siglo XVIII, la población de Potosí cayó en picado. De unos 160.000 habitantes hacia 1610, bajarán a 70.000 en 1700; luego a 40.000 tras la epidemia de peste de 1719, que mató a un tercio de la ciudadanía; a 24.000 en 1778.

La disminución de la actividad minera y el descenso de la población desde 1650 débense, sobre todo, a la falta de aprovisionamiento regular de mercurio barato proveniente del Perú, ya que el procedimiento de beneficio mediante amalgamación necesita cantidades importantes de azogue. A partir de mediados del siglo XVII, México se convierte en el mayor productor de plata de las Indias españolas, suplantando definitivamente a Potosí.

La Pequeña Edad de Hielo, un período de un frío excepcional, comenzó hacia 1500 y perduró hasta cerca de 1850; abarca, pues, casi todo el período colonial español en Potosí (1545-1825). Entre 1560 y 1641 se mantuvo más bien seco. En la región de Potosí, sus habitantes pasaban momentos muy difíciles y la carencia de agua acompañaba a la depresión económica; entre 1705 y

Amalgamación de la plata

En tiempos de la colonia, el mineral de plata se transportaba desde la mina hasta el patio del ingenio en morrales y a lomos de llama, asno, mulo o caballo. La llama fue el animal más utilizado; la administración española requisaba miles de ellas. El mineral en forma de pequeños pedazos de unos diez centímetros de ancho se colocaba en un rincón del patio, para secarlo durante algunos días. Las trituradoras utilizadas en Potosí se parecían a las inventadas a comienzos del siglo XVI y empleadas en los ingenios de Sajonia; estaban equipadas con cuatro a seis mazos calzados, en un extremo, cada uno con una almadaneta de hierro o de bronce.

Gracias a una serie de levas y sorbabos (espigones), los mazos se levantan unos después de los otros unos veinte centímetros antes de caer sobre los trozos de mineral. El eje, que accionaba los mazos, lo movía una rueda hidráulica cuyo diámetro comprendía entre cuatro y seis metros. Casi toda la construcción era de madera; donde era necesario se empleaba grasa para lubri-





Este esquema (*izquierda*) realizado en el siglo XVIII por el cronista Arzáns, que vivía en Potosí, ilustra el papel esencial del agua en el tratamiento de la plata. El agua fluía de la Ribera, un canal que atravesaba la ciudad, y sus derivaciones alimentaban el acueducto (*cen-*

1742, dos de cada tres años sufrieron una sequía devastadora.

Pedro Vicente Cañete, administrador asistente del gobernador y corregidor de Potosí durante unos treinta años, consigna la historia de la región en una obra acabada en el decenio de 1780. Describe allí las reformas de Carlos III. Durante su reinado (1759-1788), la Corona hace un último esfuerzo para restaurar la economía de las colonias y reiniciar la explotación de las minas de plata.

El número de ingenios hidráulicos instalados en la Ribera y en regiones y ríos aledaños a la ciudad varía según el volumen de la producción de las minas y la ley de las vetas de plata. En la Ribera se pasó de cinco ingenios, en 1576, a 49 en 1583 y a 81 en 1633. En toda la región de Potosí se numeraron 96 ingenios en 1601, y 140 en 1610. En la Ribera, eran sólo 34 las cabezas de ingenio en 1693, año característico de la gran crisis que duró de 1650 a 1750; y finalmente 79 cabezas o 33 ingenios en 1788, durante una época de nueva bonanza de la metalurgia de la plata: el tercer momento de esplendor minero.

La "mita"

Los indios mitayos pagaron un pesado tributo a la explotación de la plata. Se dice que en 1573, arranque de los grandes trabajos, fueron movilizados unos 20.000 indios para la construcción del primer embalse, la laguna Chalviri. Muchos de ellos, obligados: la mita. Se les reclutaba desde más de 600 kilómetros de distancia. El trabajo forzado afectaba a todos los varones de 18 a 50 años de edad de las comunidades indígenas, desde el lago Titicaca, al norte (el Perú actual), hasta la región de Tarija (en la frontera actual con Argentina), al sur.

Hacia 1750, la población andina, mermada por las epidemias y las condiciones de trabajo, particularmente duras en las minas y en los ingenios, sólo era un cuarto de la de 1533, fecha de la llegada de los españoles (las trituradoras desprendían un fino polvo que los obreros aspiraban; de otro lado, manipulaban sin precaución el mercurio tóxico). Pero los mestizos, los pequeños comerciantes y todas las categorías exentas de trabajos forzados se multiplicaron. Asimismo, trabajadores libres (mingas) eran empleados en las minas e ingenios de amalgamación.

En 1780, los indios sometidos a los trabajos forzados apenas sumaban 2880, frente a los 13.340 llamados en 1573 y 10.460 en 1617. En 1750, el rey de España reconocía la amplitud de las pérdidas humanas desde el comienzo de la "mita", confirmando que sólo unos veinte indios trabajaban como obreros y peones en cada ingenio hidráulico, frente al doble de comienzos de la instalación de ingenios de agua.

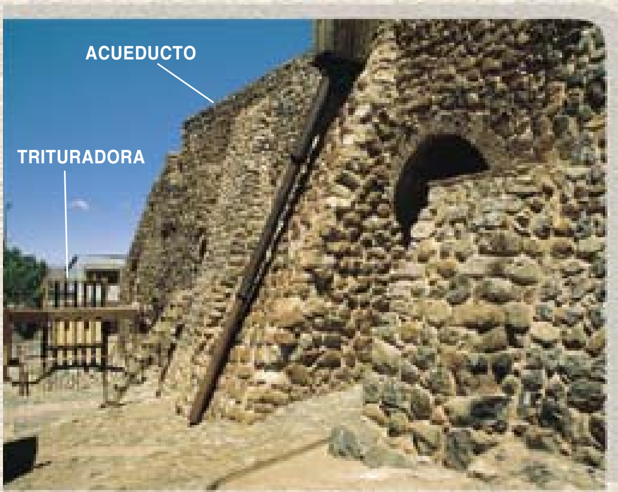
Según algunos historiadores, sólo gracias a la explotación cada vez más dura de esta mano de obra gratuita habría tenido lugar el tercer momento de esplendor minero entre 1780 y 1800 (la mita no se abolió hasta 1812). Sin embargo, la bonanza de Potosí es frágil a finales del siglo XVIII. España envió administradores, expertos internacionales y misiones científicas para reactivar y modernizar las minas, pero la resistencia al cambio era notable. Los empresarios, que no querían invertir en nuevas instalaciones, rechazaban la técnica de los "barriles", que habría acelerado la formación de la amalgama. En el método de "barriles", en lugar de dejar la plata amalgamarse con el mercurio en los cajones, mal denominados "buitrones", el mineral y otros reactivos químicos se agregaban a los cajones giratorios. La agitación aumentaba la velocidad de reacción, ya que el pro-

car. El mineral se trituraba hasta un tamaño de grano de varios milímetros; cada almadaneta podía fragmentar unas 20 toneladas por mes.

Una rueda circular de piedra, accionada y enfriada con agua, reducía al mineral hasta un polvo fino (harinas). El conjunto de esas dos etapas de reducción se denomina fragmentación (trituración y molienda). El material, luego, era clasificado con la ayuda de cribas (cedazos de telas de alambre) según la granulometría deseada. El material más fino se transportaba al centro del patio, almacenado en cajones de 50 centímetros de alto, dos metros de ancho por tres de largo, unos junto a otros.

En los cajones se efectuaba la amalgamación. A la "harina" de mineral se le agregaba agua y, uno después de otro, diferentes reactivos (sobre todo sulfato de cobre, estaño o plomo, cloruro de sodio y cal) y mercurio, cuyo papel era esencial en el procedimiento. Durante unos quince días, la mezcla seguía reaccionando en los cajones. Se procedía después al lavado. La ganga, más ligera, salía por un canal de evacuación, mientras que la amalgama de plata y mercurio se quedaba en el fondo de los estanques. Se la recogía en pella. Después de escurrirla, se prensaba en moldes o piñas. Puesta al horno, a casi 360 ºC, el mercurio se volatilizaba. De cada piña se recogía plata pura del 95 %.

En esta cadena de producción, el agua interviene en muchas etapas.



***tro*) que llevaba el agua hasta el corazón de los ingenios. El agua accionaba las trituradoras de mazos; se utilizaba también en el procedimiento de amalgamación, que se hacía en "buitrones". A la derecha, un acueducto restaurado y una trituradora.**

Inundación de la laguna San Ildefonso en 1626

El embalse de San Ildefonso, concluido en 1576, es una de las primeras obras realizadas por los colonizadores. Se construyó con depósitos morrénicos compactados por el hombre, sin la suficiente consolidación. Los diques de la época colonial se levantaron sin desaguadero, lo que obligaba a vigilar el nivel de las lagunas. En caso de desagüe, se abrían las compuertas; si con ello no bastaba, los obreros hacían deprisa un paso para las aguas cuando subían.

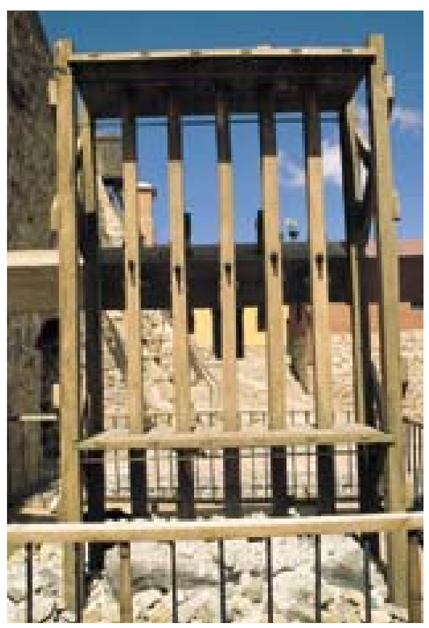
El domingo 15 de marzo de 1626, hacia las 13 horas, después de una temporada de lluvias abundantes, la laguna de San Ildefonso (4410 m) se llenó. Desafortunadamente, el descuido del más alto funcionario de la Corona, el corregidor, que tenía también el cargo de gobernador, ocasionó la catástrofe de las lagunas. No se había preocupado de la crecida de las aguas y no mandó abrir las compuertas a tiempo. El viento comenzó el desagüe, una ola desbordó y se abrió una brecha en el dique. El dique terminó de romperse y el contenido de la reserva de agua se derramó sobre la ciudad de Potosí. Según algunos testigos, de 122 cabezas de ingenios instaladas en Potosí y en Tarapaya, menos de la mitad resistieron las oleadas. La mitad de la ciudad, a unos dos kilómetros aguas abajo del embalse, quedó bajo el agua; 360 casas de españoles y 800 ranchos de indígenas fueron destruidos. Dos factores explican la magnitud de la catástrofe: la fragilidad de las construcciones potosinas y la superpoblación a lo largo de la Ribera. Los autores contemporáneos describieron la exigüidad y la mala construcción de las casas, que se desmoronaban por fuertes lluvias o chubascos de granizo. Además, a la hora de la catástrofe todos los habitantes estaban en sus casas. Las ruedas hidráulicas de tres toneladas de peso, arrastradas por las oleadas, arrasaban las viviendas.

La catástrofe, una de las más trágicas en toda la historia de los embalses, se cobró más de 2000 víctimas. A ello hubo que añadir la intensa contaminación ambiental por el mercurio, plata pura, sulfato de cobre, cal, minerales en fase de pretratamiento y colas o ganga en la Ribera.

Después del desastre, los españoles reconstruyeron y consolidaron los diques de San Ildefonso y de San Sebastián. El embalse de San Ildefonso fue restaurado por última vez en 1973-74. Mide ahora unos 500 metros de largo y, en el punto más alto, el dique que cierra la obra alcanza una altura de doce metros. El dique de 1626 era sin duda menos alto.

ceso concluía en 24 horas, mientras que hacían falta unos quince días en el procedimiento de los cajones. Además, en las postrimerías del siglo XVIII, la mano de obra resultaba insuficiente. El mercurio escaseaba y el aprovisionamiento de energía hidráulica era deficitario, a causa de una sequía general en los Andes, entre 1780 y 1810.





2. EL AGUA UTILIZADA PARA LA TRITURACION y después para la molienda de los minerales se filtraba en un acueducto (construido de mampostería) y accionaba las ruedas hidráulicas de madera (*izquierda*) alimentadas desde arriba por el chiflón. El eje de la rueda estaba unido a los mazos trituradores por un árbol de levas (*derecha*), cuyas almadanetas golpeaban el mineral sobre un morterado. Las trituradoras podían tener mazos a un solo lado y se llamaban ingenios de una cabeza; o a ambos lados, denominándose de dos cabezas. Luego se hacía pasar el mineral troceado por otra rueda hidráulica hasta convertirlo en polvo fino. Por fin, se amalgamaba con el azogue para así recuperar la plata.

El comienzo del siglo XIX conoce dos crisis de producción de la plata. Entre 1800 y 1805, la Ribera paró muchas veces, y la importación del mercurio extraído de las minas españolas quedó interrumpida por las guerras napoleónicas, de manera que los minerales argentíferos ya no podían ser tratados. Luego, la lucha por la independencia de los estados sudamericanos desorganizó los circuitos de producción. La población de Potosí alcanzó su mínimo histórico durante ese período turbulento. En 1807, sólo 13.700 personas vivían en la ciudad. Durante la visita del Libertador Simón Bolívar, en octubre 1825, Potosí se había convertido en una ciudad-fantasma de 8000 habitantes, menos de la decimosexta parte de la población de comienzos del siglo XVII. La mayoría de los habitantes habían huido a causa de la larga Guerra de la Independencia de Bolivia, que duró 16 años (de 1809 a 1825) y arruinó la actividad minera. Potosí fue sucesivamente saqueada, perdida o retomada por los independentistas de Argentina o por los realistas españoles.

El vapor es salvador, pero el "patrón oro"...

En 1825, año de la independencia, el Alto-Perú toma el nombre de Bolivia. Empieza el período republicano de la explotación de la plata.

Hacia 1840, la producción mejora. Se trata del cuarto momento de esplendor minero de la historia de Potosí. El máximo de la producción no alcanzó, empero, la mitad de lo conseguido en los años 1750-1800. La llegada del vapor y de la electricidad en 1872 corresponde al quinto momento de esplendor. La fuerza hidráulica ya no es el único motor de la explotación. Sin embargo, se mantuvo el sistema hidráulico colonial para abastecer a la población de fines del siglo XIX. Subsisten aún algunas pequeñas instalaciones en la Ribera, donde se trituraba el mineral de contrabando y de baja ley, pero la maquinaria quedó anticuada. A finales del siglo XIX, sólo persistían 17 ingenios hidráulicos.

En 1891, dando un revés a la economía boliviana, los Estados Unidos adoptaron el "patrón oro", que acabó con la plata en el sistema monetario internacional. La desmonetización de la plata supuso el fin de su principal demanda. Los mineros y los empresarios bolivianos decidieron entonces explotar el estaño, extraído también del Cerro Rico y cuya demanda creció hasta la crisis mundial desencadenada por la quiebra de la bolsa de metales en octubre de 1929. La producción récord del mismo año fue de 47.100 toneladas. Sin embargo, la demanda de estaño se mantuvo durante y después de la crisis económica de los años treinta, ya que el metal era indispensable para la producción de bronce aleado con el cobre. Además, el estaño se requería en la fabricación de latas en la industria de la conserva. El precio del estaño no se hundió hasta 1985, con la instalación de la industria del reciclado de metales en la economía occidental; al reciclarse la hojalata, los ingresos relacionados con el estaño escapan de manos de los bolivianos.

La restauración de las lagunas

En 1935-1936, William Rudolph, ingeniero norteamericano, restauró, con 800 obreros, el sistema de embalses en cascada heredado de los españoles. Fue contratado por Mauricio Hochschild, propietario de minas de origen alemán y uno de los tres magnates del estaño. En 1929, el grupo Hochschild proporcionaba ya el diez por ciento de la producción boliviana.

Hacia 1930, seis lagunas alimentan aún a Potosí, que contaba con 35.000 habitantes, la quinta parte de la población de la ciudad durante su apogeo. Pese a ello, se decide restaurar los embalses porque las necesidades de agua de la población en el siglo XX eran superiores a las de la época colonial. Además, las compañías que explotan el estaño exigían la provisión continua de agua durante todo el año.

La restauración de las lagunas fue empresa difícil. En Potosí, todas las compuertas de evacuación, menos dos, se hallaban en pésimo estado. Talladas originalmente en tronco de árbol, luego fundidas en bronce, las compuertas constituían el elemento más frágil de la ingeniería colonial. Por añadidura, los diques de las lagunas sufrían filtraciones; cuando estaba llena, la de Chalviri perdía 80 litros por segundo.

Para mejorar el abastecimiento de agua del Potosí industrial se construyeron nuevas lagunas, que se apoyaban sobre los antiguos diques y con cimientos enterrados un metro en roca sana. La laguna Chalviri planteaba una dificultad particular, porque no podía vaciarse. Hubo que levantar un nuevo embalse aguas abajo de la represa de la colonia; el espacio intermedio se rellenó de hormigón. El conjunto forma un solo dique de cinco metros de espesor. Por último, los diques no eran, en su generalidad, lo bastante elevados como para retener toda el agua en caso de lluvias torrenciales; el agua desbordada se escurría en cascadas que deterioraban las obras. Se levantó la coronación de los diques sin desaguadero y se reconstruyeron los túneles de evacuación.

Pero no pudo restaurarse todo. Muchas lagunas de la colonia desaparecieron para siempre. Además, la fuerte sedimentación de otras planteaba un problema irresoluble: la de San Sebastián, con sedimentos en un espesor de 95 centímetros, había perdido 80.000 metros cúbicos de capacidad. Las lagunas de la época colonial restauradas en 1936 continúan hoy abasteciendo a la población y a la industria metalúrgica de Potosí. Unos treinta ingenios, que emplean la técnica de flotación de minerales sulfurosos introducida a finales de siglo XIX (desplazó a la amalgamación), funcionan actualmente produciendo concentrados de zinc-plomo-plata. Algo de estaño se recupera por procesos gravimétricos.

Hoy en día, la rueda de madera de un ingenio hidráulico en Potosí vuelve a girar, dentro de un programa de arqueología industrial financiado por la cooperación española, mediante la sustitución de piezas usadas y el reemplazo de algunos componentes por elementos de hierro. Concebidos a fines del siglo XVI, siguieron en servicio hasta 1872, al inicio de la modernización de la industria minera. Su solidez y su fácil reparación fueron un obstáculo para el cambio técnico y promovieron indirectamente la decadencia de Potosí.

Sin embargo, Potosí sigue siendo, en el corazón de sus habitantes y de los españoles, así como a los ojos de los historiadores, la fabulosa Villa Imperial del Nuevo Mundo. Aquella donde los caballos de los nobles tenían caparazón de hilo de plata y arneses cubiertos de esmeraldas. La que hizo soñar a Cervantes, que en 1590 redacta una solicitud a su rey para ser nombrado corregidor de la ciudad de La Paz, vecina de Potosí. En *Don Quijote*, cita las minas del Potosí como el símbolo de la riqueza absoluta. Por el contrario, después de la independencia de los estados sudamericanos, Potosí se volvió sobre todo para los bolivianos y para los peruanos en el símbolo de la explotación de los indios, de la humillación de los colonizados y del saqueo de los recursos mineros por el extranjero. El trabajo forzado de generaciones de indígenas, de 1573 a 1812, en las minas y los ingenios de plata, sigue siendo la cara negra de Potosí. Los indios celebraban su partida hacia la Montaña de Plata como una ofrenda a la diosa de la Tierra (la "Pachamama") y como un viaje sin retorno. Si el Olimpo del Cerro Rico fue generoso para los colonizadores, Potosí fue el infierno, en las entrañas de la tierra, para miles de indígenas.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

SUR LES TRACES DE L'ARGENT DE POTOSI. Emmanuel Le Roy Ladurie, et al., en *Annales ESC*, n.º 2, págs. 483-505, París, marzo-abril, Armand Colin, 1990.

POTOSÍ Y SUS LAGUNAS. Carlos Serrano y Julio Peláez, en *Revista de Investigaciones Históricas* (Potosí), págs. 14-130, 1995-1997.

EL ARGENTO Y LA HULLA BLANCA. Alain Gioda y Carlos Serrano, en *Anuario 1999*, Archivo y Biblioteca Nacionales de Bolivia, Sucre, en prensa.

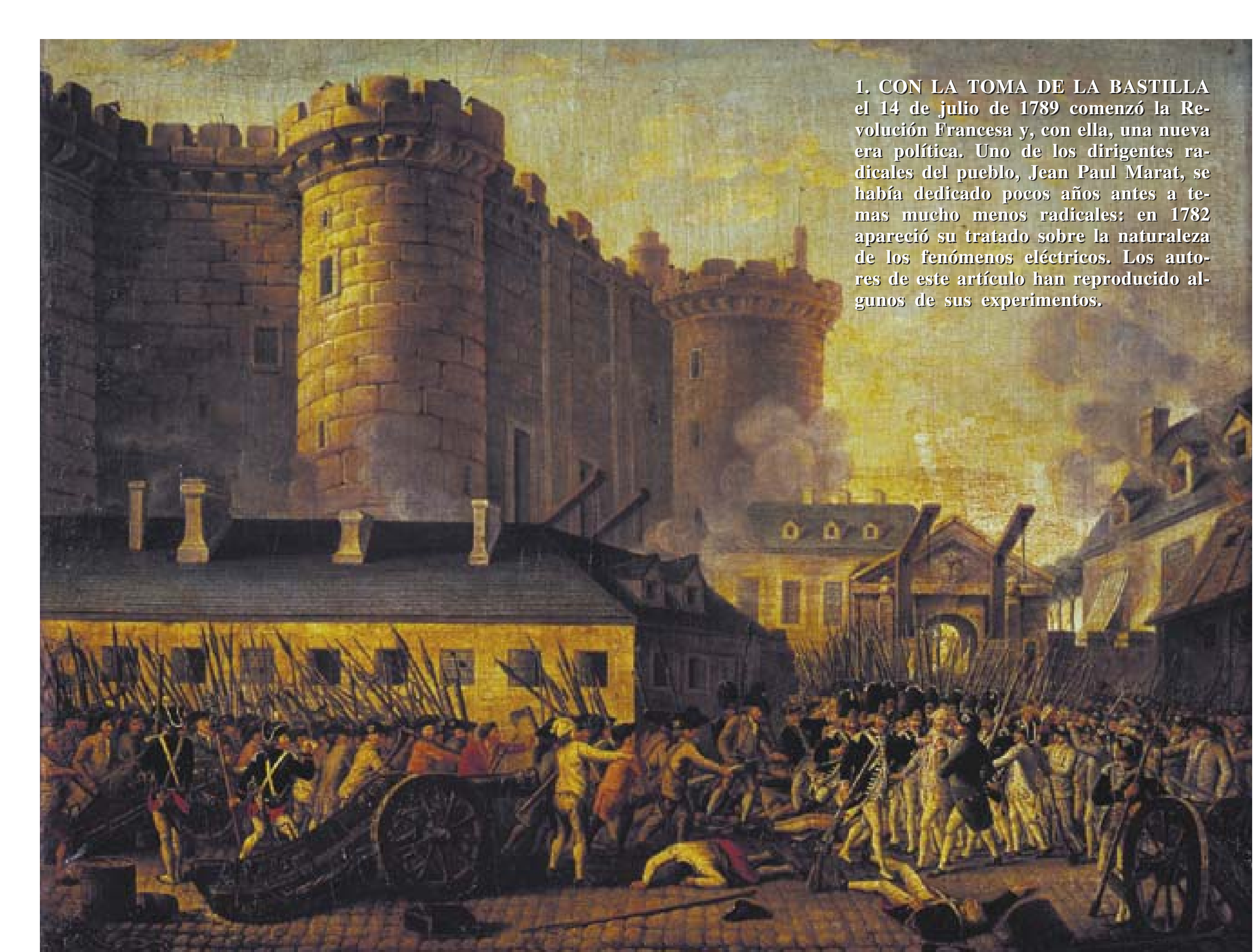
La reproducción de experimentos históricos

Quien intente reproducir experimentos decisivos en su contexto histórico —se trate de hilar seda o de ejercitar los músculos con una bomba manual— se encontrará con varias sorpresas

Peter Heering, Falk Riess y Christian Sichau

La presencia constante de la ciencia y la técnica en todos los ámbitos de la vida es fenómeno harto reciente. Hasta el siglo XVII no empezaron los investigadores a desarrollar el método científico. De acuerdo con éste, sólo se considera probado aquello que pueda observarse experimentalmente y, en principio al menos, reproducirse.

Galileo Galilei (1564-1642) fue su precursor. En 1590 descubrió que todos los cuerpos que estén sobre la superficie terrestre se hallan sometidos a una misma fuerza dirigida hacia abajo, en cuya virtud la velocidad de un cuerpo que cae —y no su recorrido— es proporcional al tiempo de caída. Pero entre los historiadores de la ciencia aún se discutía, a principios de los sesenta del siglo XX, si Galileo había descubierto experimentalmente la ley de caída de los cuerpos a partir de esferas que rodaban en un plano inclinado. No pocos creyeron que sólo había efectuado experimentos mentales. No fueron los primeros escépticos. Hacia 1636 Marin Mersenne (1588-1648), físico francés y cofundador de la Aca-



1. CON LA TOMA DE LA BASTILLA el 14 de julio de 1789 comenzó la Revolución Francesa y, con ella, una nueva era política. Uno de los dirigentes radicales del pueblo, Jean Paul Marat, se había dedicado pocos años antes a temas mucho menos radicales: en 1782 apareció su tratado sobre la naturaleza de los fenómenos eléctricos. Los autores de este artículo han reproducido algunos de sus experimentos.

demia de Ciencias de París, criticaba: "Me pregunto si el señor Galileo ha realizado los experimentos sobre la caída a lo largo de planos inclinados, ya que no lo afirma en ninguna parte y las proporcionalidades que él da contradicen a menudo el experimento." Quizá Mersenne no logró reproducir los experimentos adecuados con resultados coincidentes.

Por eso se llegó a dudar de que los resultados de Galileo pudieran obtenerse con los métodos experimentales y de medición de entonces. El estudio de sus publicaciones, cartas y manuscritos no aclaró mucho más. Así las cosas, el historiador de la ciencia Thomas B. Settle repitió en 1961 algunos de los experimentos siguiendo las descripciones de Galileo, entre ellos el mencionado por Mersenne. Lo hizo con éxito; sus mediciones experimentales coincidieron plenamente con la regularidad declarada por Galileo. La disputa se resolvió, por fin, con el hallazgo de una página de un manuscrito escrito por Galileo que contenía algunas mediciones.





2. CON SUS EXPERIMENTOS para ahondar en la naturaleza de la electricidad, Marat (*a la izquierda en un retrato de 1793*) se apoyó sobre todo en la investigación de las descargas eléctricas. Para ello cargó una botella de Leyden, una forma temprana de condensador (*a la derecha*), con una máquina para electrizar, entonces usual, y observó las chispas de las descargas en un proyector de sombras.

Este ejemplo ilustra uno de los principales problemas a los que debe hacer frente la historia de la ciencia: entender el experimento histórico en su contexto científico y social; no obstante ese fin deseable, el estudio de las fuentes aporta con frecuencia muy poca información.

Para descubrir qué condiciones ejercieron una influencia decisiva en el éxito de los experimentos, es inevitable la repetición, mejor aún, la reproducción, que abarca, por supuesto, el estudio de las fuentes disponibles y demás métodos establecidos en la investigación de la historia de la ciencia. El método de replicación desarrollado en el departamento de física de la Universidad Carl von Ossietzky de Oldenburg entraña una triple fase: la construcción lo más fielmente posible de los aparatos e instrumentos originales, la reproducción de las acciones experimentales por parte de las personas implicadas y la reconstrucción del contexto científico, histórico y social del experimento.

¿Cuáles fueron las condiciones que posibilitaron el éxito de Galileo y otros cuando realizaron sus experimentos? ¿Tenían a su disposición unos materiales concretos? ¿Había útiles especiales de instrumentistas no citados, locales especiales, ayudantes que no aparecen en las notas o gozaban de habilidades peculiares? La replicación ofrece una nueva visión del experimento histórico, así como una nueva interpretación de las fuentes disponibles.

Valgan tres ejemplos más: los experimentos de Jean Paul Marat sobre la naturaleza de la electricidad, el experimento de torsión de Charles Augustin Coulomb sobre la acción de la fuerza entre cargas eléctricas (ley de Coulomb) y el descubrimiento del efecto Joule-Thomson, fundamento del proceso de conversión de los gases en líquidos, llevado a cabo por James Prescott Joule y William Thomson.

El experimento como espectáculo

Muchos saben que, hasta su asesinato, Jean Paul Marat (1743-1793) fue un líder radical del pueblo. Pero pocos conocen los experimentos de este médico para aclarar una de las preguntas candentes de la ciencia de aquellos tiempos: ¿cuál es la naturaleza de los fenómenos eléctricos? Con ese propósito realizó no menos de 212 experimentos, que publicó en 1782 en su análisis de 461 páginas (por aquella fecha ya había editado tratados de alcance similar sobre el calor y la luz).

Dominaba entonces entre los físicos la teoría del fluido. Se postulaba la existencia de uno o más fluidos (gases o líquidos) materiales, muy ligeros y escurridizos, que podían atravesar todos los cuerpos. A ellos se acudía para explicar fenómenos diferentes como la luz o el calor. ¿Era la electricidad una combinación de materiales de este tipo?

Marat se propuso demostrar con experimentos cualitativos su idea de fluido eléctrico, distinto por completo del calor y de la luz. Para ello debía hacerse perceptible: "El líquido eléctrico se muestra sólo cuando actúa..." Y eso acontecía evidentemente en la descarga de cuerpos eléctricos. Ni corto ni perezoso, Marat investigó las chispas de las descargas.

En sus trabajos se sirvió de aparatos típicos de la investigación de su tiempo, como el generador electrostático. El primero había sido construido en 1660 por Otto von Guericke (1602-1686). Se desarrolló como fuente de electricidad común: un trozo de cuero con revestimiento de amalgama u otro objeto fricativo se apoyaba sobre un vidrio que rotaba, y se cargaba eléctricamente; la carga se acumulaba a través de unas puntas metálicas en una bola metálica (conductor) y luego se volvía a descargar espectacularmente en una chispa. En vez de un conductor Marat empleaba a menudo botellas de Leyden, más adecuadas para almacenar electricidad. Las habían inventado en 1745, por separado, E. Jürgen von Kleist (1700-1748) y Pieter van Muschenbroek (1692-1761).

Muy pronto ese viejo condensador pasó a formar parte del utillaje de todo laboratorio de electricidad. Constaba de una botella de cristal cubierta por dentro y fuera por laminillas de estaño; la laminilla interior se cargaba con un generador electrostático y la exterior estaba conectada a tierra.

En algunos experimentos Marat llevó a cabo la conexión eléctrica con agua, sal o vino tinto. Comparó las chispas que aparecieron y su color. Hemos conseguido reproducir los experimentos y registrado las correspondientes observaciones que coinciden ampliamente con las descripciones realizadas en el trabajo de Marat en 1782. Comprobamos, además, cuán difícil resulta explicar con palabras los fenómenos visibles. Para Marat eso no supuso ningún problema, porque llevó a cabo sus experimentos ante el público, manera habitual entonces de hacer creíble la veracidad de los resultados científicos.

Otros experimentos del investigador, una vez leídos sus escritos, siguen siendo enigmáticos. He aquí el modo en que se propuso demostrar que los fluidos magnéticos diferían de los eléctricos. Acercó una aguja giratoria y cargada magnéticamente a un imán; luego, a una botella de Leyden; en ambos casos la aguja se movía. A continuación sumergió la aguja en agua, y repitió el experimento. Ahora, según las descripciones de Marat, la aguja no reaccionaba ante la botella de Leyden. Incomprensible esa descripción en un principio, la reproducción deja suponer que el condensador se descargó al acercarse al agua. Este detalle no se encuentra en sus apuntes, quizá porque a Marat le parecía más interesante la generalidad de los fenómenos que las explicaciones rigurosas y pormenorizadas.

Intereses muy distintos perseguía Charles Augustin Coulomb (1736-1806). A nuestro ingeniero militar no le importaba ni el número ni las propiedades de los fluidos eléctricos, sino la descripción matemática de sus relaciones físicas. Coulomb fue nombrado en 1781 miembro de la Academia de Ciencias de París, institución decisiva en todas las cuestiones científicas, por sus trabajos sobre el magnetismo y la estática en las construcciones. Sólo tres años después de la publicación de Marat, en 1785, comenzó, ante esta sociedad, con la exposición de sus trabajos sobre electrostática que se prolongaron durante seis años y se publicaron en seis memorias.

En las dos primeras describió sendos experimentos cuyos resultados sirvieron de soporte para la ley fundamental de la electrostática que hoy lleva su nombre.

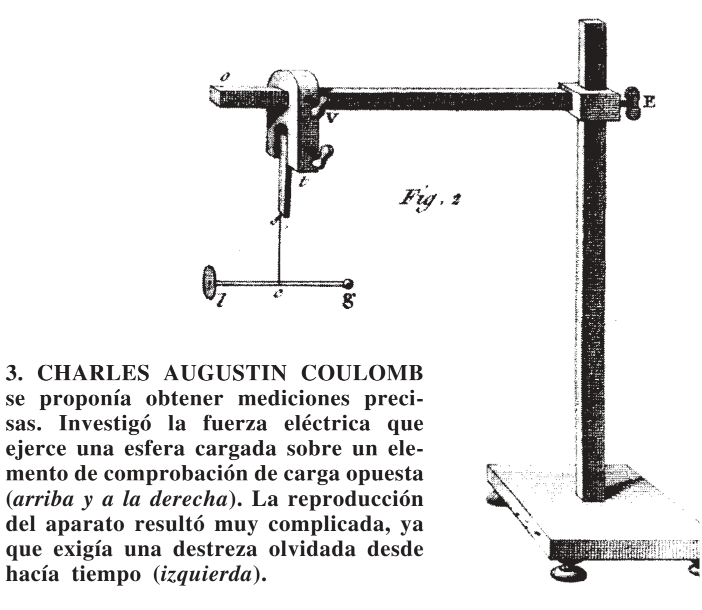
En uno de ellos buscaba Coulomb probar que la fuerza de atracción entre dos cargas electrostáticas disminuye con el cuadrado de la distancia. Para ello fijó al final de una varita fina de goma laca (resina de uso en medicina) un disco de pan de oro del tamaño de un penique. Además necesitó un hilo muy fino y sin retorcer, sacado del capullo de un gusano de seda, del cual colgaba la varita en un caballete de madera. Colocó esta parte del montaje delante de una gran bola metálica aislada eléctricamente.

La bola y el disco adquirieron cargas opuestas; así, el disco se vio atraído por la bola. Según sus propias descripciones, Coulomb desvió lateralmente la varilla junto con el disco, y la varilla empezó a oscilar alrededor del punto del que colgaba. Determinó el período de oscilación de la torsión, que decrecía conforme aumentaba la fuerza de atracción; esta fuerza era a su vez dependiente de la distancia entre la bola y el disco. Coulomb dio tres pares de medidas que para él representaron una prueba suficiente de la formulación de la ley.

De tal guisa suele aparecer el experimento coulombiano en historia de la física. Al replicarlo nos proponíamos resolver una cuestión que se plantean muchos: ¿por qué llegó a conclusiones de tamaño alcance con sólo tres mediciones?

Ya en el montaje se vio que las cosas eran todo menos fáciles. Naturalmente, los laboratorios de la universidad podían construir el caballete de madera, pero de entrada nadie disponía de los conocimientos necesarios sobre los materiales y habilidades indispensables para reproducir el sistema compuesto de la varilla de goma laca, el hilo de seda y el disco de pan de oro. El sujeto replicador tenía primero que adquirir cualidades similares a las de sus predecesores históricos. ¿Cómo se extrae un hilo suficientemente largo de un capullo? ¿Cómo preparar una varilla de goma laca? ¿Con qué y cómo se le





3. CHARLES AUGUSTIN COULOMB se proponía obtener mediciones precisas. Investigó la fuerza eléctrica que ejerce una esfera cargada sobre un elemento de comprobación de carga opuesta (*arriba y a la derecha*). La reproducción del aparato resultó muy complicada, ya que exigía una destreza olvidada desde hacía tiempo (*izquierda*).

puede fijar un disco de pan de oro? ¿De qué manera se disponen y ajustan la varilla y el disco para que cuelguen horizontalmente? Era necesaria una gran dosis de inspiración que sólo se podía adquirir con la destreza en el manejo de los materiales. Esta maestría queda, desde luego, sin mencionar en las publicaciones históricas, por la poderosa razón de que tampoco admiten una explicación cabal.

Contradicciones y preguntas sin responder

Para proceder al desvío de la varilla había que andar con sumo tiento, si no queríamos exponernos a romper el hilo o aplastar el pan de oro. Para evitar cualquier corriente de aire molesta debíamos movernos con extrema delicadeza y contener la respiración. Coulomb se vería también con semejantes contratiempos. En ningún caso se planteó la realización pública del experimento.

Según nuestros ensayos, fue crucial para su éxito la cantidad de carga de la esfera: si era muy pequeña, no se podía medir correctamente la oscilación; si muy grande, un movimiento pendular con dirección a la esfera se solapaba con la oscilación causada por la torsión, y ya no se podía medir de forma precisa su duración.

En consecuencia, los aspectos importantes del montaje y realización del experimento sólo se revelaron después de su reproducción. Experiencia que resultó válida para el segundo ensayo descrito por Coulomb sobre la determinación de la ley que relaciona la distancia con la fuerza, basado en la repulsión de cargas iguales. El instrumento de medición básico fue una balanza de torsión: un pequeño cilindro de cobre colgaba de un hilo de plata de 0,04 milímetros de espesor, que fijó por su extremo superior a un micrómetro de torsión (así lo denominaba Coulomb). Perpendicularmente al hilo había, también fija, una vara no conductora que llevaba en un extremo una bola de médula de saúco. Esta se hallaba en contacto, durante el experimento, con una segunda bola, que estaba quieta.

PETER HEERING, FALK RIESS y CHRISTIAN SICHAU son historiadores de la ciencia. Heering se doctoró con una tesis sobre la ley de Coulomb en la Universidad Carl von Ossietzky de Oldenburg, en cuyo departamento de historia de la ciencia dirige Riess un grupo de didáctica de la física. Sichau es especialista en historia de la termodinámica del siglo XIX.



4. CHARLES AUGUSTIN COULOMB (1736-1806) buscó relaciones cuantitativas entre magnitudes físicas.

Si las dos presentaban cargas idénticas, se repelían y el cable se torcía. Coulomb sabía, de sus anteriores experimentos para medir el campo magnético y para determinar el ángulo de torsión de hilos metálicos, que se requería una fuerza directamente proporcional al ángulo para realizar una torsión; sabía, además, que la fuerza de repulsión eléctrica disminuía conforme aumentaba la distancia. Por consiguiente, tenía que haber una situación de equilibrio en la que la fuerza repulsiva y la de retroceso se compensasen: la bola móvil permanecería en reposo.

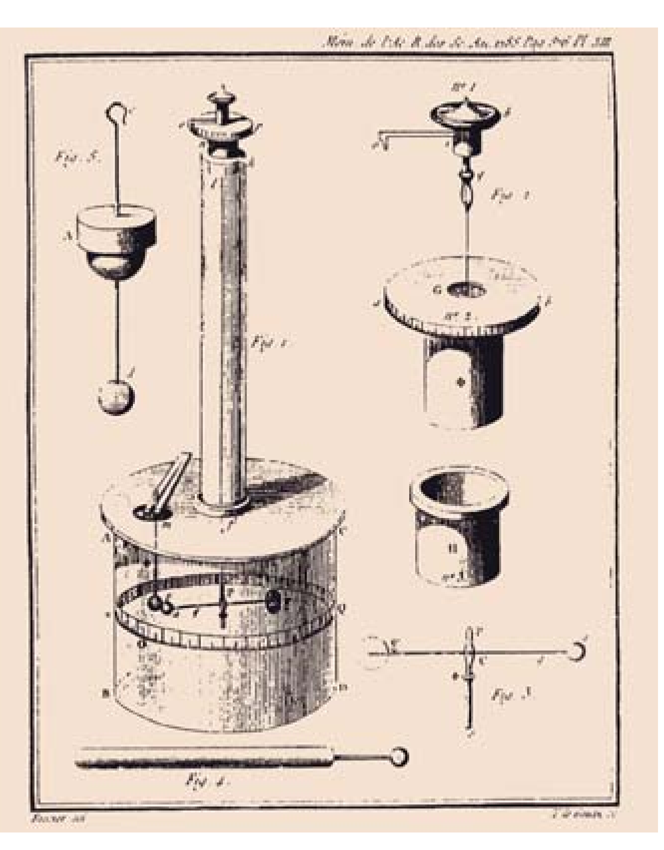
Torciendo aún más el hilo, Coulomb alteraba la situación de equilibrio. La primera bola se acercaba a la segunda y oscilaba alrededor de una nueva posición de equilibrio. Con el micrómetro de torsión podían seleccionarse y leerse exactamente los correspondientes ángulos y posiciones que servían como medida de la fuerza repulsiva. Se obtuvieron así pares de ángulos de torsión y de distancias cuyas relaciones correspondían a las fuerzas repulsivas y sus correspondientes distancias entre las dos bolas. En resumen: Coulomb no determinó las fuerzas electrostáticas de forma absoluta, sino su mutua relación.

De nuevo publicó sólo tres pares de valores para respaldar su ley. Con su instrumento podía medir en principio fuerzas muy pequeñas correspondientes a un peso de una masa de una millonésima de gramo. Pese a todo, ¿cómo podía estar tan seguro?

El montaje experimental se reveló aquí también problemático. Coulomb utilizó por varas aislantes hilos de seda recubiertos con goma laca. La manipulación del fino hilo de plata, que debía soldarse a un soporte fijo, exigía una práctica tenaz.

La realización del experimento nos deparaba una sorpresa: la balanza de torsión no proporcionaba ninguna medida que coincidiera con la regularidad dada por Coulomb. No se obtenía una dependencia inversamente proporcional a la distancia, según proclamara el francés. Sólo mediante una





5. COULOMB GENERO una fuerza electrostática repulsiva (*a la derecha*), cargando por igual una bola de médula de saúco fija y otra suspendida y que podía girar. En contra de esta fuerza actuó la fuerza recuperadora de un cable de torsión, del que pendía la bola giratoria. Gracias a un sistema para medir ángulos y giros, determinó la posición de equilibrio del sistema una y otra vez, obteniendo así una serie de pares de valores. Adujo tres de ellos en prueba de la ley de la fuerza electrostática postulada por él mismo. Pero la reproducción que los autores han llevado a cabo en la Universidad Carl von Ossietzky de Oldenburg plantea la duda de si verdaderamente llegó a medir dichos valores.

instalación para apantallar las cargas externas, entonces desconocida, pudimos medir finalmente los valores correspondientes. La causa de estos problemas estribaría, probablemente, en cargas eléctricas de la vestimenta del experimentador.

Coulomb hubo de pugnar, a buen seguro, con las mismas dificultades. ¿Cómo consiguió sus mediciones? Si descartamos cualquier intento de falseamiento, quedan pocas posibilidades. ¿Lo consiguió con medidas que mantuvo en secreto, para eliminar el problema de las cargas externas (conectando a tierra su vestido o realizando el experimento desnudo)? ¿O quizás escogió medidas adecuadas que coincidían con su convicción de que la ley eléctrica debía estar estructurada de forma análoga a la gravitatoria descubierta por Isaac Newton (1643-1727) en 1666?

En este punto el método de replicación deja traslucir sus limitaciones. No se puede repetir un experimento físico después de 200 años. A este respecto, Mary Trumpler, de la Universidad de Yale, recordó que no se podía reproducir con suficiente fiabilidad la vestimenta o la peluca de Coulomb. Aun así, las fuentes escritas nos indican que cargas externas (probablemente del propio experimentador) interfirieron también en otros experimentos de Coulomb, sin que pudiera hacer nada para remediarlo.

¿Por qué investigó Coulomb la electrostática a pesar de tales problemas? Nuestras pesquisas en el archivo de la Academia de Ciencias de París revelaron que en 1784, justo antes de estos trabajos, la regia institución buscaba una protección óptima, técnica y económica, contra los rayos para los polvorines. A tal efecto se creó una comisión, que contó entre sus miembros a Coulomb. Sus investigaciones se inscribían, pues, en un programa que tenía como objetivo los cálculos fundamentales de un pararrayos ideal.

De la ley natural a la medición precisa

A través de su reproducción, los experimentos reciben ante nuestros ojos una nueva perspectiva. Se descubre, al propio tiempo, que Marat y Coulomb siguieron métodos muy diferentes. Marat contempló la descarga de chispas como un medio fundamental para el entendimiento del fenómeno; sus experimentos se preparaban de suerte tal que sus efectos se demostraran con claridad ante el público. A él le importaba determinar la naturaleza de la electricidad. Para Coulomb esa cuestión carecía de interés; de hecho, sugería que sus resultados eran igualmente válidos bajo el supuesto de uno o dos fluidos. Le importaba mucho más la descripción cuantitativa y matemática. Con ese planteamiento, realizó mediciones de precisión en sus investigaciones sobre la electricidad.

De ellas se sirvieron, con no menos fortuna, ya en la primera mitad del siglo XIX, los que braceaban con la termodinámica y la física de energías. Uno de los experimentos clásicos que se mencionan en los manuales de física es el denominado "efecto Joule-Thomson". De acuerdo con el mismo, un gas real que fluya dentro de un recinto a baja presión se enfriará o calentará según su temperatura inicial esté por encima o por

debajo de un valor típico para dicho gas. Esta temperatura "inversa" es mayor que la temperatura ambiente para el aire, el nitrógeno y el dióxido de carbono, mientras que es menor para el hidrógeno y el helio.

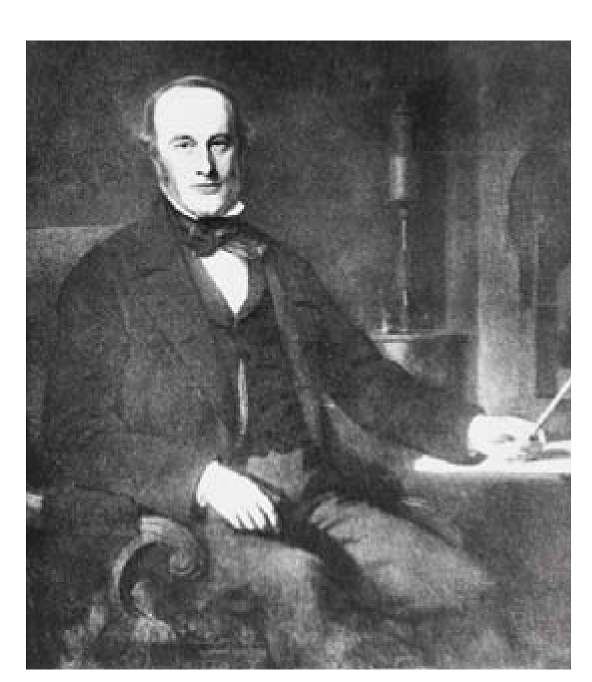
En mayo del año 1852 William Thomson (1824-1907) viajó a Manchester. El joven profesor de Glasgow acudía para acometer ciertos ensayos con James Prescott Joule (1818-1889), un acomodado autodidacto y propietario de una cervecería. Joule, que propugnaba el principio de conservación de la energía, había ya realizado numerosos experimentos a modo de prueba. Pero se le cerraban las puertas del reconocimiento académico y esperaba franquearlas con el apoyo de Thomson, una figura respetada. Sobre todo buscaba respaldo en su disputa con el médico alemán Julius Robert Mayer (1814-1878) sobre la prioridad en la formulación del principio de conservación de la energía. En los siguientes experimentos Joule se proponía destruir las pretensiones de Mayer con la prueba de un fallo en la argumentación.

En el experimento replicado por nosotros se bombeaba aire con una bomba manual a través de un conducto que en uno de sus extremos estaba cerrado con un tapón parcialmente permeable, de suerte que pudiera ejercerse presión en el tubo. Los dos científicos sumergieron en un baño de agua el conducto espiral para que el aire que fluía estuviera a una temperatura determinada. Detrás del tapón poroso midieron la temperatura del aire: era significativamente menor.



6. EN LA REPRODUCCION DEL EXPERIMENTO de James Prescott Joule y William Thomson de 1852 se comprobó que su ejecución exigía la intervención de al menos dos personas: para lograr unas condiciones experimentales estables había que generar durante más tiempo una corriente de aire regular con ayuda de la bomba manual.

En el museo de Manchester se conservan piezas del montaje original, lo que simplificó bastante la replicación. Aun así, hubo que proceder con cautela. Joule había reutilizado piezas del montaje en experimentos posteriores y, por tanto, las había alterado. Para la precisión del experimento fue decisivo proporcionar una corriente de aire regular con la bomba de mano: con tan sólo pequeños cambios en el ritmo del bombeo percibimos variaciones indeseables de la temperatura. Esta experiencia coincide con una nota a pie de página en las publicaciones de Joule y Thomson en las que informaban sobre el mismo problema.



7. JAMES PRESCOTT JOULE (1818-1889) propagó el principio de conservación de la energía.

Pero no mencionaron en ningún sitio —ni en sus publicaciones, ni en cartas, ni en su cuaderno de laboratorio— cuánto tiempo se debía estar bombeando, ni quién fue el que lo hizo. En la replicación se ajustó la temperatura de la corriente de aire saliente a un valor mensurable de forma exacta, después de cinco o seis minutos aproximadamente. Según la libreta de laboratorio de Joule, en algunas realizaciones experimentales se requirieron hasta 48 bombeos por minuto para mantener la presión necesaria en el conducto. Una serie de medidas registraba hasta 10 mediciones individuales. Resumiendo: había que bombear durante aproximadamente una hora de forma regular, lo que suponía un notable esfuerzo corporal.

Además, alguien tenía que remover el baño de agua para evitar cambios en la temperatura del tubo. A su vez, el experimentador debía leer el termómetro y el manómetro. La replicación hizo patente que el experimento no lo podía haber llevado a cabo una sola persona. Thomson permaneció sólo diez días en Manchester. Según las publicaciones fue Joule el que llevó a cabo los experimentos. El cuaderno de laboratorio de Joule y el intercambio de cartas con Thomson nos muestran, además, que muchos experimentos sólo funcionaron después de la partida de Thomson. ¿Quién experimentó, pues,

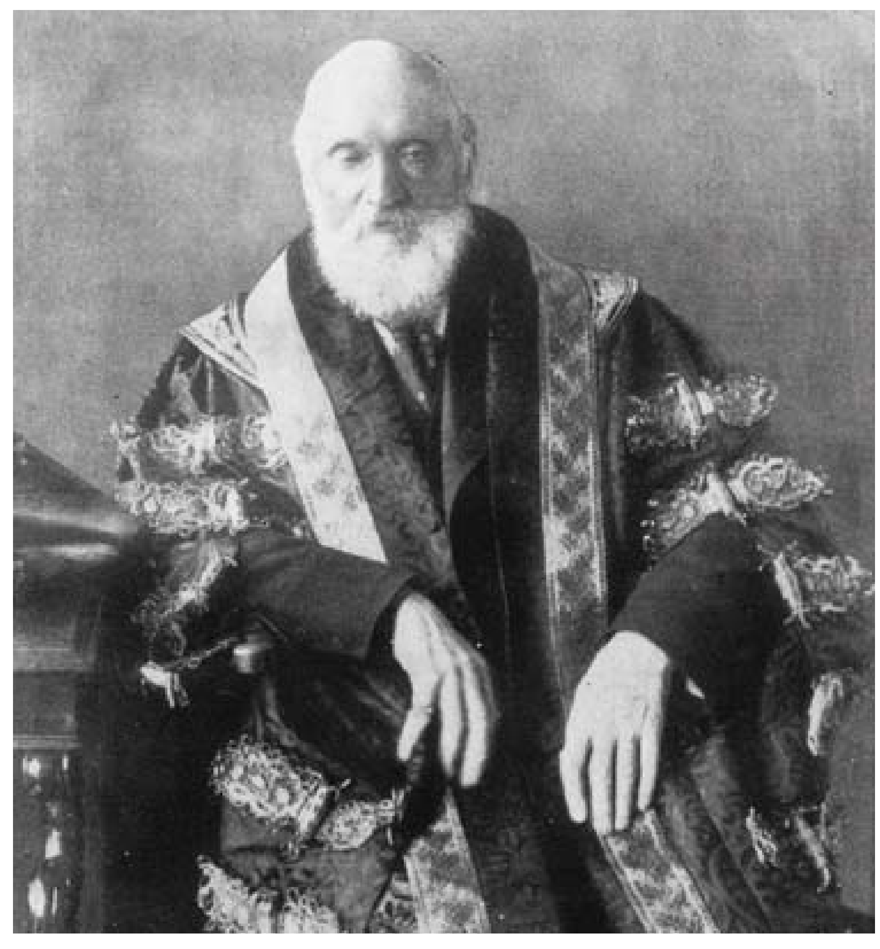
en el sótano de la casa de Joule en el número 1 de Acton Square?

Probablemente Joule se limitó a la lectura del termómetro y del manómetro, que, en la mentalidad de entonces, constituía la tarea decisiva del experimentador. Además, nuestro hombre padecía desde su infancia de una enfermedad en la espalda; no podría haberse permitido un bombeo tan forzado. Le tuvo que ayudar al menos otra persona, hasta ahora desconocida, probablemente alguien del servicio o un operario de la cervecería.

Esa era una diferencia palmaria entre el "laboratorio privado" de Joule y el entorno investigador y docente de Thomson. Mientras que en éste intervenían los alumnos y había contratado un asistente, no hay constancia escrita de que nadie ayudara a Joule en su laboratorio, aunque de la replicación resulta manifiesto que precisó colaboración para realizar los experimentos. Cuando en otoño del mismo año Thomson preguntó a Joule si necesitaban contratar un asistente para los trabajos a acometer, le respondió que no hacía falta. Parece que contaba con los medios de la cervecería; en cierta carta a Thomson se lee su clara aversión hacia los "asistentes que trabajan a su aire".

Por ese motivo, Joule y Thomson empezaron desde 1852 a realizar los experimentos con una infraestructura más potente, en la que una máquina de vapor accionaba la bomba de aire. Esperaban lograr así una corriente de aire mayor y más regular. Pero la máquina trabajaba peor que los desconocidos ayudantes; tardaban de una hora y media a dos horas en compensarse los cambios de presión en el conducto y poder tomarse las primeras medidas.

De las anotaciones de la libreta de laboratorio sobre el número de bombeos por minuto se puede extraer información sobre otro punto: el tapón utilizado. Joule trabajó inicialmente con una llave de paso casi cerrada y luego con un trozo de cuero. Con la llave no hubo forma de reproducir resultados satisfactorios; nos concentramos, pues, en la búsqueda de cuero adecuado.



8. EL FISICO BRITANICO William Thomson (1824-1907) fue uno de los precursores de la termodinámica.

Todo dependía del tapón

Probamos con tres piezas distintas. Obtuvimos los "mejores" resultados experimentales con un trozo de cuero cuya porosidad coincidía bastante con la del tapón de Joule. Por eso creemos que dedicó particular atención a tales pormenores, aunque nada indique sobre ello en sus notas. La permeabilidad escogida por Joule era un compromiso óptimo entre alternativas opuestas: establecer una presión elevada en el conducto, con una frecuencia de bombeo adecuada, y conseguir una corriente de aire regular tan cerca como fuera posible detrás del tapón. La importancia del tapón se advierte también en las constantes modificaciones del mismo que Joule y Thomson realizaron en experimentos posteriores.

Fue asimismo determinante para sus conclusiones el método de medición de las pequeñas diferencias de temperatura: la elección del termómetro adecuado y su ubicación. En razón del propio montaje experimental, había una limitación importante para el termómetro: en su extremo inferior al menos debía tener un diámetro máximo de cuatro milímetros para que cupiera en el estrecho conducto. Joule y Thomson se mostraron poco explícitos sobre los instrumentos empleados.

El termómetro que nosotros utilizamos difería del empleado por Joule en un punto importante: tenía más mercurio porque su depósito era cilíndrico, no esférico. Supuso un acierto, pues el termómetro es entonces menos sensible a las pequeñas variaciones espaciales o temporales de la corriente de aire.

Las mediciones conseguidas en la replicación coincidían bastante con las esperadas según la teoría. En cambio, Joule y Thompson no estuvieron satisfechos con sus medidas del verano de 1852. Si bien creían que habían demostrado el enfriamiento del aire al expandirse, no podían conseguir ninguna concordancia con sus expectativas teóricas. Esto último era, además, falso, como pudieron comprobar un año más tarde. De sus mediciones se desprende que el termómetro utilizado por ellos reaccionaba con demasiada sensibilidad ante pequeñas variaciones.

Para el análisis histórico conviene saber de dónde procedían los instrumentos manejados. En el verano de 1852, Joule tuvo que comprar unos termómetros, pues ya poseía to-



9. EN LA CIUDAD INDUSTRIAL DE MANCHESTER, aquí mostrada en un grabado coloreado hacia 1850, los científicos encontraron expertos en la fabricación de los instrumentos de medida que precisaban.

dos los aparatos restantes. Con anterioridad había recurrido al buen hacer de John Benjamin Dancer (1812-1887), habilidoso fabricante de instrumentos; no sería extraño que volviera a acudir a él. La fabricación de instrumentos, aunque limitada, fue actividad notable en la industria artesana de Manchester. La disponibilidad de semejantes recursos locales se hizo patente cuando en 1853 Joule y Thomson llevaron a cabo sus experimentos con un montaje, bastante mayor, accionado por una máquina. Ello requería los conocimientos y destreza de ingenieros, técnicos y artesanos altamente cualificados que no faltaban en la ciudad fabril. Pero Dancer dejó pronto de tener un papel relevante, pues Thomson se trajo consigo instrumentos de medida fabricados en París. Hacia 1850 había comenzado en el Observatorio londinense de Kew la producción de los "termómetros estándar". Andando el tiempo, en 1872, Joule diría que cuantos trabajaban en el campo de la termodinámica habían comprado sus termómetros a esta institución. De aquí podemos colegir también que la precisión de las medidas constituía un objetivo de la investigación física; la normalización de los instrumentos garantizaba la reproducción del ensayo.

Comparado con los trabajos de Coulomb, se aprecia ahora una visión distinta. Cierto es que se trataba del establecimiento de una ley que permitiera descripciones cuantitativas, pero Joule y Thomson no escogieron en la presentación de sus resultados las medidas que sólo coincidieran con sus expectativas teóricas, por más que tales resultados fueran decepcionantes, al menos al principio y desde su punto de vista.

Con sus trabajos se labraron un lugar en la historia de la física. Sus instrumentos, cuadernos de laboratorio y epistolarios merecen hoy un sitio en archivos y museos. Por supuesto, no transmitieron la praxis de sus experimentos. Las replicaciones reabren de nuevo el contexto histórico y social y hacen que la evolución del conocimiento de las ciencias de la naturaleza sea más transparente. Son un complemento importante de los métodos hasta ahora utilizados en la exposición de la historia de la ciencia.

Analizados los experimentos, podemos valernos de sus reproducciones para múltiples aplicaciones en la docencia de la física en centros de enseñanza media y superior. Una transmisión de conocimientos que incluya la historia aportará valiosos recursos técnicos y metodológicos, amén de hacernos ver la función social de la física. Hasta los profanos pueden sacar partido de las replicaciones. Mientras que los aparatos originales han de permanecer a resguardo en vitrinas, protegidos por su interés histórico y singularidad, los visitantes de los museos pueden realizar pruebas experimentales con las reproducciones.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

JEAN PAUL MARAT: SCIENTIFIC AND REVOLUCIONARY. Clifford D. Connor. Humanities Press; Atlantic Highlands, New Jersey, 1997.

DAS GRUNDGESETZ DER ELEKTROSTATIK. Peter Heering. DUV, Wiesbaden, 1998.

WELT ERFORSCHEN–WELTEN KONSTRUIREN: PHYSIKALISCHE EXPERIMENTIERKULTUR VOM 16. BIS ZUM 19. JAHRHUNDERT. Dirigido por Peter Heering; Isensee, Oldenburg, 1998.

Lluvia y bosque mediterráneo

El agua de lluvia incidente en un ecosistema cambia de composición y volumen hasta reaparecer en superficie, tras su paso por el suelo

Juan F. Gallardo Lancho, M. Amparo Vicente y Gerardo Moreno

La lluvia es el primer proveedor de agua de las comunidades vegetales. Arrastra consigo elementos químicos de interés, cuya cuantía varía de un día a otro y de una estación a otra. Del agua que cae de la atmósfera, cierta porción queda retenida por las hojas y ramas del dosel arbóreo, expuesta a la evaporación.

El agua que atraviesa el dosel arbóreo y arbustivo, agua de trascolación, arrastra a su vez los elementos químicos de la cubierta vegetal. Súmense a ello, en la estación seca, los aerosoles o polvos atmosféricos que se depositan durante la sequía y que se disuelven parcialmente al inicio de la estación húmeda.

Más tarde, las aguas de trascolación atraviesan la hojarasca forestal en descomposición, donde se producen intercambios de bioelementos. De esa interrelación resultan unas veces ganancias en la concentración de las aguas circulantes y otras pérdidas, según se sigan lavando, o lixiviando, elementos solubles de los restos vegetales o permanezcan absorbidos en éstos.

En algunos ecosistemas forestales cobra importancia el escurrimiento cortical o fustal del agua que, recogida por las ramas, desciende por el tronco. Al prolongarse su contacto con el tejido vegetal, el agua adquiere alta concentración en bioelementos, que acaban por nutrir las raíces. Sin embargo, la cantidad total de agua de escurrimiento fustal suele ser baja.

J. F. GALLARDO, G. MORENO y M. A. VICENTE colaboran en la investigación de la transferencia de substancias orgánicas del suelo a aguas superficiales. Gallardo, profesor de la Universidad de Salamanca, es especialista en biogeoquímica ambiental, edafología y substancias húmicas. Moreno, biólogo, y Vicente, química, trabajan bajo la dirección de aquél en la estación de Navasfrías.

El agua que lixivia la hojarasca forestal puede luego, inducida por la gravedad terrestre, infiltrarse en el suelo permeable. Puede darse también un flujo paralelo a la superficie del suelo, que lo erosiona al tiempo que se carga de partículas en suspensión.

En los ecosistemas concurren simultáneamente un proceso de adsorción física y otro de absorción química. La suma de ambos conforma la sorción del sistema. Por adsorción se entiende la atracción física, débil y reversible por lo común, de un elemento sobre la pared de una partícula. En la absorción química un bioelemento pasa al interior de una partícula orgánica u organismo, de forma irreversible casi siempre.

Parte del agua que llega al suelo se emplea en humedecerlo, quedando retenida en los poros más finos o microporos (agua capilar). La otra parte se pierde por circulación rápida hacia la profundidad (agua gravitatoria) a través de grietas y túbulos del suelo. Las plantas aprovechan sólo el primer tipo de agua, gran parte de la cual constituye la reserva de agua útil.

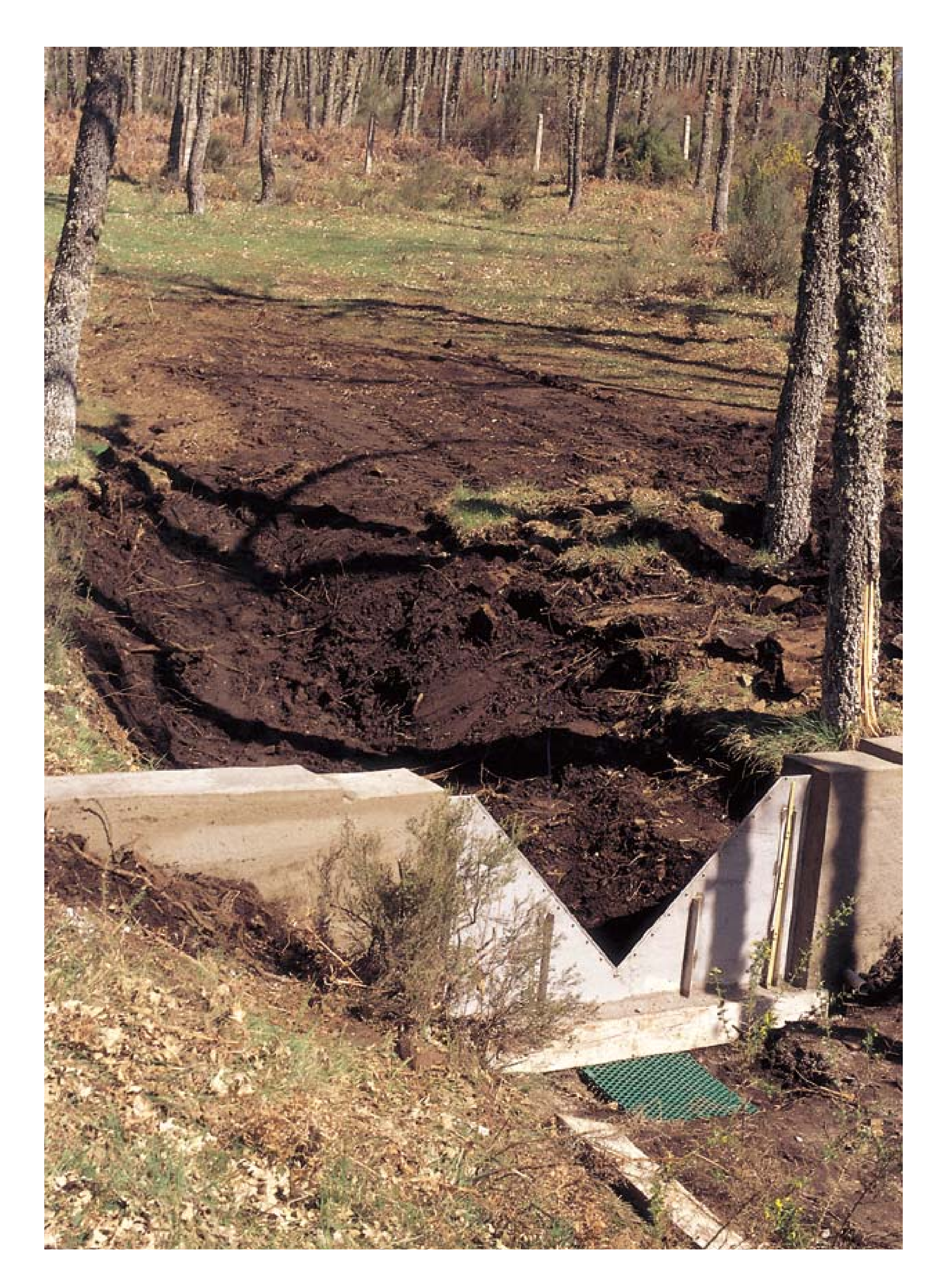
Algunos bioelementos enriquecedores del agua que alcanza el epipedón edáfico, así se llama el horizonte superior del suelo, se retienen sorbidos en los primeros centímetros del suelo. Pero otros nutrientes, solubles y más abundantes en el epipedón, se soltarán y enriquecerán el agua. Por tanto, el agua que ha atravesado el epipedón edáfico suele diferir en composición del agua que llega a la superficie del suelo.

Conforme el agua edáfica atraviesa los horizontes del suelo aumentan los procesos de sorción, depurándose al ser aliviada en su contenido de bioelementos. Por otro lado, la concentración del agua que ocupa los microporos varía de acuerdo con la presión a que está sometida y con la intensidad de la actividad vegetal.

Parte del agua edáfica se evapora por el calentamiento de la superficie edáfica o la absorben las raíces y se evapora una vez alcanza las hojas. Ambos procesos, simultáneos, definen la evapotranspiración. A diferencia de lo que acostumbra suceder en los ecosistemas mediterráneos, cuando el agua no constituye un factor limitante se alcanza la evapotranspiración máxima o evapotranspiración potencial (PET). Lo normal es que, al menos durante el verano, haya escasez de agua y no se alcance dicho valor máximo de evapotranspiración; nos encontramos entonces ante unos valores más bajos, o evapotranspiración real (AET).

Por último, parte del agua de drenaje profundo puede aflorar en superficie a través de manantiales, origen de arroyos y ríos. El agua de los manantiales tiene una composición química variable, que depende del régimen de lluvias, roquedo, tipo de suelos, vegetación, cantidad y ca-

1. DISPOSITIVO para medir el balance biogeoquímico de la cuenca. Las entradas se producen con la lluvia y los polvos atmosféricos, si no hay procesos erosivos con acarreos de otras cuencas vecinas. Las salidas sólo son posibles a través de las aguas del riachuelo que drena la cuenca, si el material rocoso es impermeable. La diferencia entre entradas y salidas es mera consecuencia de los procesos, biológicos o edáficos, que se producen en el interior de la cuenca, bien en la cobertura vegetal, bien en el interior del suelo.







2. SITUACION de la parcela forestal de Navasfrías en la provincia de Salamanca y vista general del rebollar (*Quercus pyrenaica* Willd.). La parcela experimental se encuentra a escasos kilómetros de la frontera portuguesa y la linde extremeña, en la vertiente norte de la Sierra de Gata. La parcela se instaló en 1989 y desde entonces se viene controlando de acuerdo con diferentes proyectos subvencionados con fondos nacionales y europeos.

lidad del humus. La composición del agua del arroyo puede modificarse aún más con la adición de factores vinculados a los procesos erosivos u otros agentes externos de origen humano o animal.

¿Cómo se conforman y comportan las concentraciones de bioelementos en cada compartimento de un ecosistema forestal mediterráneo?

Se ha seleccionado para este estudio una cuenca forestal conformada por un monte medio de rebollo (*Quercus pyrenaica* Willd.), de unos 60 años de edad y aclarado (820 árboles por hectárea), situado en la vertiente norte de la sierra de Gata. Se encuentra en el término municipal de Navasfrías, a escasos kilómetros de la frontera portuguesa. El océano Atlántico, al oeste, dista poco más de 200 kilómetros. Al tratarse de una comarca forestal de interés económico marginal, el influjo antropozoógeno es escaso, con una insignificante carga ganadera o aprovechamiento maderero. Muy alejada de zonas industriales y mineras, se halla exenta de contaminación industrial o urbana.

El clima es mediterráneo húmedo a subhúmedo. Las lluvias se concentran en otoño y primavera, por lo que gran parte del período activo vegetal coincide con la estación estival seca; ello ocasiona un déficit estival de humedad, variable de año en año, más en relación con la distribución de las lluvias que con la intensidad de éstas. La precipitación media anual es de 1580 litros por metro cuadrado y año, mientras que la temperatura media anual es de 10,4 ºC.

A partir de un roquedo de esquistos paleozoicos meteorizados se ha formado un suelo forestal ácido y rico en materia orgánica, poco evolucionado (cambisoles húmicos). En algún que otro punto pueden aparecer leptosoles húmicos, según la intensidad de la erosión o posición topográfica. En todo caso, son suelos ácidos y con notable variación lateral en profundidad. La porosidad edáfica, aunque varía en función del contenido orgánico edáfico, es alta. Sin embargo, la reserva de agua útil puede considerarse baja, dada la escasa proporción de arcillas en el suelo. Este ecosistema se supone característico del oeste ibérico, con bosques mediterráneos montanos y poco antropozoogenizados.

Los datos se recogieron en sendas campañas que abarcaban desde marzo de 1990 hasta septiembre de 1993 y desde septiembre de 1996 hasta septiembre de 1997. Se colocaron tres pluviómetros, más otros tres provistos de pantallas aerodinámicas, que recogen también polvos atmosféricos. Los pluviómetros eran todos de polietileno inerte. Se dispusieron 12 lisímetros al azar bajo los árboles para recoger las aguas de trascolación. Otras 12 espirales se instalaron en los troncos de los árboles, teniendo en cuenta las clases diamétricas, con el fin de recoger el agua de escurrimiento cortical.

Se excavaron tres perfiles edáficos para el estudio del suelo. Se colocaron seis cajas, dos por cada perfil edáfico, para recoger el agua de escorrentía superficial, más otros seis lisímetros, dos por cada perfil, a una profundidad de 20 centímetros para recoger el agua que drenó del horizonte húmico, y otros seis entre los 60 y 100 centímetros, según la profundidad y morfología de cada perfil, para recoger el agua de drenaje edáfico más profundo. También los lisímetros se construyeron de polietileno inerte. Para seguir la evolu-

ción de la humedad edáfica nos servimos de una sonda de neutrones. Por simple gravimetría calibrábamos la humedad edáfica.

Para obtener el balance total del agua se consideró que cualquier variación del contenido del agua edáfica es la diferencia entre el agua neta (descontando a la lluvia la evaporada en el dosel arbóreo) que llega al suelo menos la evapotranspirada por suelo y plantas, la perdida por escorrentía superficial y la perdida por drenaje profundo (gravitatoria).

Medíamos el volumen de agua tras cada episodio de lluvia, recogiéndose para su posterior análisis químico. La solución edáfica se obtuvo mediante lisímetros de tensión con cápsula de porcelana, a diferentes profundidades cada 15 días, en la época húmeda del suelo.

Calculábamos los flujos de nutrientes multiplicando el contenido medio de nutrientes por la correspondiente cantidad de agua, ya sea medida o calculada, de lluvia (Bp), escorrentía superficial (Sr) o drenaje profundo (D) para cada fracción de agua.

Para averiguar el balance de nutrientes, es decir, la diferencia entre las entradas y las salidas de los mismos, basta con restar, de la suma de los bioelementos introducidos con la lluvia y los polvos atmosféricos, los bioelementos que se pierden por escorrentía superficial y drenaje profundo. Obviamente, si resulta un signo positivo, se tendrá que el sistema gana bioelementos y si resulta negativo, pérdidas.

Para estimar las salidas hídricas de la cuenca se construyó una presa de aforo, impermeable; el análisis de muestras de agua en diferentes momentos de intensidad de caudal habría de darnos las pérdidas de nutrientes de la cuenca. Se realizaron los análisis químicos completos del agua en el período de lluvias o con agua edáfica en la misma semana de muestreo. Antes de proceder a los análisis químicos de las muestras se pasaron éstas por un filtro de fibra de vidrio.

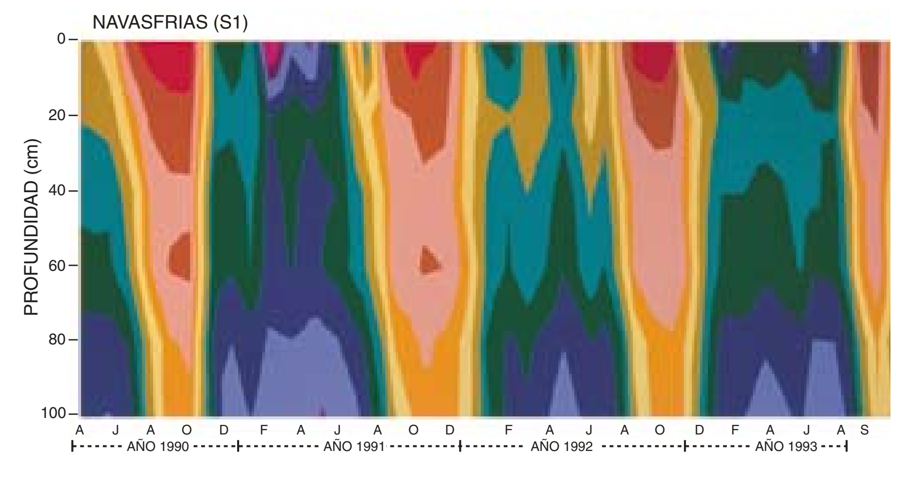
La pluviometría constituye un factor decisivo en la dinámica de los ecosistemas mediterráneos. El período lluvioso transcurre de octubre a mayo, con dos zonas: la primera, bien definida, de octubre a febrero, y otra, más variable en intensidad y tiempo, de marzo a mayo. El agua de lluvia atraviesa mayormente (el 85 %) el dosel arbóreo (trascolación), mientras que sólo un pequeño porcentaje (1 %) discurre por los troncos de los árboles (escurrimiento cortical o fustal) de los rebollos. El resto (casi un 15 %) de la lluvia total se evapora antes de llegar al suelo. Entre el escurrimiento cortical y la pluviometría total se ha encontrado una correlación significativa.

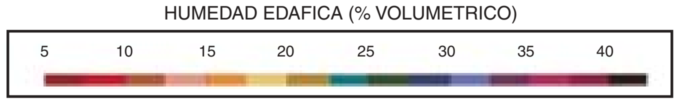
La suma de trascolación más escurrimiento fustal proporciona el agua que contribuye a la reserva hídrica edáfica; el resto del agua no llega a mojar el suelo. Debido a la buena permeabilidad del suelo y a la escasez de fuertes pendientes, el volumen de escorrentía superficial, muy bajo, no llegaba al 1 % de la pluviometría total.

Las cantidades hídricas puestas en circulación oscilan de un año a otro. Y, como es de suponer, el agua a disposición del vegetal depende en gran medida de la lluvia que caiga durante mayo y junio. Por ejemplo, el año 1990 pudo considerarse casi normal (1300 litros por metro cuadrado y año) mientras que 1991 fue muy seco (777 litros por metro cuadrado y año); 1992 fue intermedio (1086 litros por metro cuadrado y año), aunque también seco. Durante el invierno de 1990 llegaron al suelo 254 litros por metro cuadrado, que sumados a los 500 litros por metro cuadrado que se recogieron en otoño, se puede decir que su suma (754 litros por metro cuadrado) sirvió de poco para estos rebollares caducifolios. Peor aún fue 1991, año que se recogieron 665 (invierno) y 231 (verano) litros por metro cuadrado. De esta manera, en 1990 sólo fueron de interés los 165 litros por metro cuadrado del período primaveral, frente a los 47 litros por metro cuadrado del año seco (1991), lo cual se tradujo en un escaso crecimiento de los árboles y caída temprana de hojas en respuesta a la sequía.

Mejor fue el año 1992. En primavera llegaron al suelo 255 litros por metro cuadrado, lo que se tradujo en una buena producción. Desde el punto de vista de la producción de estos rebollares, por tanto, la cantidad neta de agua que llega al suelo durante el final de la primavera —cuando echan las hojas— y el comienzo del verano reviste mayor interés que la pluviometría total. La evapotranspiración real depende, a su vez, de las lluvias del período primaveral. La evaporación potencial suele oscilar menos y es del orden de 800 litros por metro cuadrado y año en el área de estudio.

Aunque el agua de lluvia invernal carezca de suficiente interés para los árboles caducifolios, sí importa para las reservas superficiales de las cuencas hídricas, pues hay una relación estrecha entre la pluviometría total invernal y el agua drenada o las aguas superficiales emanadas de una cuenca. Así, para nuestra área de estudio, al sumar la pluviometría a partir de oc-





3. EVOLUCION TEMPORAL DE LA HUMEDAD de un perfil edáfico típico forestal de Navasfrías, correspondiente al período de 1990 a 1993. Se evidencia un año seco (1991), frente a otro relativamente húmedo (1990). Dentro de cada año, existen características propias, como una primavera seca o lluviosa, o un período seco estival o invernal más o menos largo, frecuentemente sin relación alguna con la característica general del año. El exceso de agua en los horizontes edáficos profundos origina la aparición de agua en el arroyo.



4. EN ESTOS LISIMETROS de trascolación se recoge el agua que ha logrado atravesar el dosel arbóreo. Luego, se comparan la cantidad y la composición del agua recogida con el agua de lluvia tomada en los lisímetros por encima de las copas de los árboles o en claros próximos.



5. TORRE CLIMATICA de la parcela con lisímetros de diferente concepción y sensores de pluviosidad, temperaturas, humedad relativa, radiación y velocidad del viento.

tubre, todo lo que supere 520 litros por metro cuadrado conduce a la aparición de arroyos en las microcuencas.

La composición química del agua de lluvia cambia desde el mismo momento que arrastra las partículas de polvo atmosférico o toca las hojas de los árboles. En ambos casos se enriquece de bioelementos. Es frecuente también la existencia de absorción o intercambio de bioelementos con las hojas. El bosque es un sistema abierto, con una entrada continua de elementos desde la atmósfera y una redistribución interna en el mismo dosel arbóreo y en la hojarasca forestal.

El enriquecimiento químico de las aguas de lluvia por el polvo atmosférico disminuye rápidamente si la precipitación se prolonga. La composición del agua de lluvia presenta un *p*H cercano a 5,4, con concentraciones superiores a 5 miligramos por litro de carbono orgánico disuelto y a 1 miligramo por litro de cloruros. En general, las lluvias de invierno son netamente oceánicas, con predominio de sodio y cloruros, que dejan paso al calcio, potasio y nitratos con las lluvias otoñales, de origen más convectivo.

El tránsito del agua de lluvia a través del dosel arbóreo por trascolación significa una mayor concentración de bioelementos, en razón de la intercepción o evaporación de la misma, así como del lavado de nutrientes de hojas y ramas. En consecuencia, aumenta la concentración iónica del agua, en particular de calcio, magnesio y potasio. El incremento relativo del cobre observado débese al polvillo levantado de antiguas minas a cielo abierto que existen en los alrededores del bosque de estudio.

El agua de escurrimiento cortical, al tener un mayor contacto con hojas y ramas, provoca un mayor lavado de bioelementos, reflejado en un fuerte aumento de la conductividad y el carbono orgánico. Además del contenido en calcio, magnesio y potasio crece también la concentración de manganeso y aluminio.

El agua de escorrentía superficial atraviesa la hojarasca en descomposición existente sobre el suelo y, por tanto, sigue enriqueciéndose de bioelementos. Se observa un incremento del *p*H y conductividad. El resultado es un lavado catiónico notable; por su parte, la mineralización orgánica contribuye a una liberalización de nitrógeno y fósforo.

En el drenaje de superficie, el agua que atraviesa el epipedón pierde nutrientes por absorción radicular o adsorción por las micelas edáficas. No obstante, continúa aumentado la concentración de aluminio y sulfatos, estos últimos como resultado de la mineralización de la materia orgánica de ese horizonte edáfico. En el drenaje profundo disminuye aún más la concentración de nutrientes por absorción radicular o adsorción micelar, poseyendo una concentración aniónica casi similar a la del agua de lluvia inicial, aunque ha decuplicado su contenido en aluminio y manganeso. En el caso del carbono, hay que tener en cuenta no sólo su sorción, sino también su propia mineralización, es decir, el paso a dióxido de carbono.

Se observa, pues, que los altos contenidos en carbono, potasio, calcio y cinc que alcanzó, en algún momento, el agua del sistema fueron decreciendo a lo largo de los múltiples procesos que experimenta el flujo hídrico descendente. El suelo, por tanto, se convierte en una suerte de purificador hídrico, a pesar de su alto contenido orgánico en superficie.

Con la profundidad del suelo cambia también la solución edáfica de los microporos. El *p*H aumenta hacia los 30 centímetros de profundidad, junto con la conductividad, signo de que hay ganancias catiónicas. A partir de esa profundidad, la conductividad desciende con la menor concentración de bioelementos. Las

bajas concentraciones observadas en las aguas de drenaje profundo indican que la cesión de bioelementos por la alteración del roquedo en descomposición en este ecosistema forestal es escasa, a no ser que las raíces actúen químicamente por contacto directo sobre la roca.

La composición del agua de lluvia incide sobre el ciclo biogeoquímico del ecosistema. En general, la aportación total al ecosistema debe considerarse baja, sobre todo de nitrógeno y azufre, lo que confirma la escasa contaminación que sufren los ecosistemas forestales del oeste español. De origen local parecen ser las entradas de fósforo y potasio.

En resumen, el flujo de nutrientes pasa de la parte superior del dosel arbóreo al suelo, o a la parte inferior de éste. Dentro del flujo destacan, por sus cantidades absolutas, el carbono orgánico, cloro, calcio y potasio; con cantidades ya menos importantes aparecen el sodio, magnesio, azufre, nitrógeno y, sorprendentemente, el cinc. Existe también un intercambio iónico con las hojas. Unos bioelementos son absorbidos (nitrógeno, azufre y cloro) y otros son lavados (potasio, magnesio, fósforo y carbono). El lavado es importante para el carbono orgánico; la absorción, para el nitrógeno. Los flujos de nutrientes por escurrimiento fustal y escorrentía superficial parecen despreciables.

El drenaje profundo marca las pérdidas de bioelementos del ecosistema. Puesto que el volumen de agua drenada varía cada año, las pérdidas de bioelementos lo harán también. Para la media de los años 1990-93 se perdieron unos 40 kilogramos por hectárea y año de carbono orgánico, 13 de cloro, 5,5 de calcio, 4,5 de azufre y sodio y poco más de 2 kilogramos por hectárea y año de magnesio, potasio y aluminio.

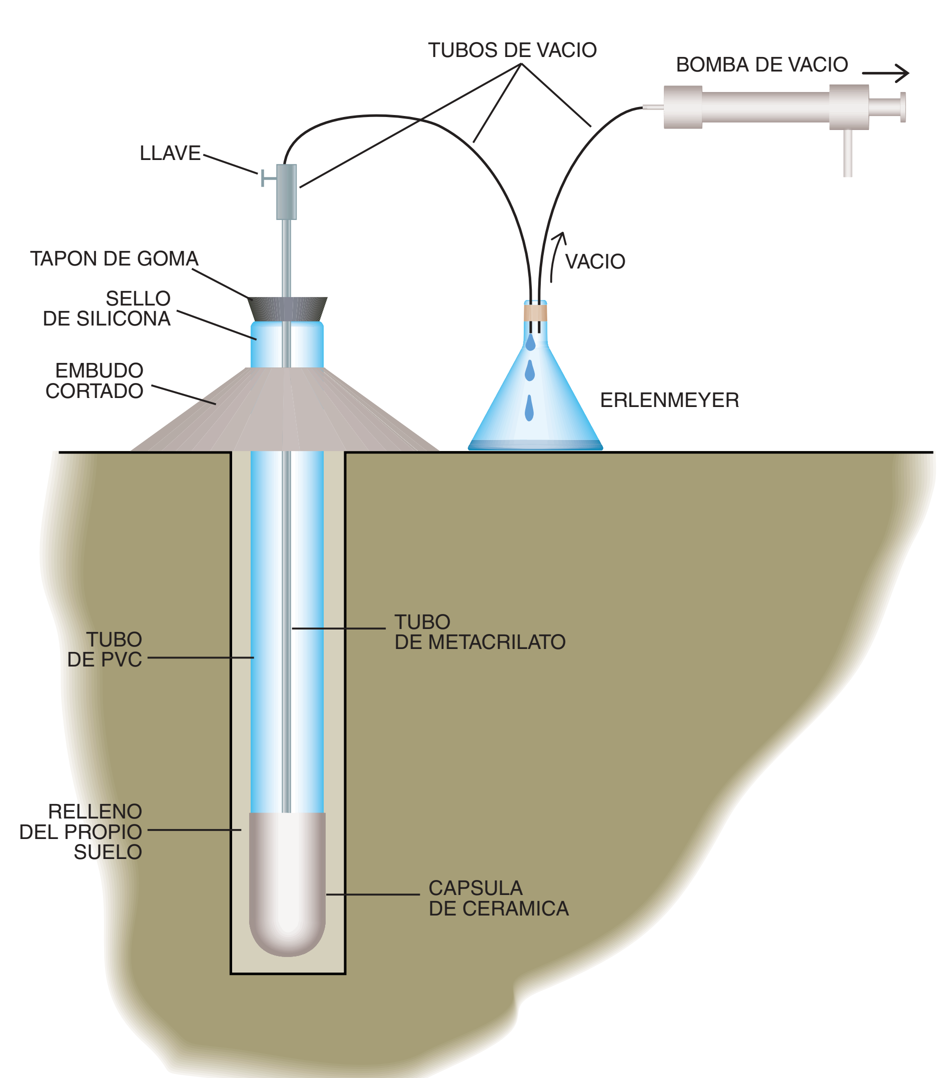
Las pérdidas del ecosistema forestal podrían compensarse con las entradas. En cualquier caso, conviene hacer un balance global para conocer las ganancias o pérdidas netas. Para gran número de nutrientes las entradas atmosféricas superan las pérdidas por el agua de drenaje profundo, por lo que hay un incremento paulatino de bioelementos en el ecosistema, en particular de carbono orgánico. Se observan, por contra, leves pérdidas de manganeso, magnesio y hierro.

En un balance de cationes y aniones, para ver si se acidifica o no el medio, descubrimos un enriquecimiento anual de cationes básicos, que favorece la fertilidad del sistema en este suelo ácido, con un *p*H cercano a 5,0. Así, hay un incremento paulatino de bioelementos en el ecosistema, del orden de 29 kilogramos por hectárea y año de carbono orgánico, 6,3 de nitrógeno, 5,5 de calcio y poco más de 1 kilogramos por hectárea y año de azufre, potasio y sodio. Por contra, se observan leves pérdidas de hierro y manganeso. La escasa pérdida de magnesio (cerca de 1 kilogramo por hectárea y año) puede estar causada por su fuerte absorbancia por el árbol dada la acidez del suelo.

La ganancia anual de cationes básicos debe compensarse con la salida de algún catión ácido, lo que explica la pérdida de casi 2 kilogramos por hectárea y año de aluminio, la más alta registrada. El desecamiento estival edáfico coadyuva a que el balance sea positivo, a pesar de la alta pluviometría y del fuerte drenaje invernal.

Una aproximación más exacta al problema puede quizás obtenerse mediante la observación del comportamiento del arroyo que drena la cuenca forestal durante todo un ciclo. El arroyo desemboca en el río Hondo, afluente del Agueda. Sus variaciones se estudiaron en una campaña que duró desde septiembre de 1996 hasta octubre del año siguiente, período caracterizado por abundantes lluvias; cayeron más de 1500 litros por metro cuadrado durante ese año húmedo.

La evaporación real en el propio dosel arbóreo fue alta, del orden de



6. SONDA DE NEUTRONES para medir la humedad del suelo. La sonda de neutrones y el sensor introducido a diferentes profundidades nos facultan para conocer la humedad del suelo y su evolución espacio-temporal de una manera rápida y fiable. A causa de la inherente presencia de radiactividad, este tipo de sondas se están sustituyendo por otros tipos de sensores no radiactivos.

500 litros por metro cuadrado y año, explicable porque el mes de junio de 1997 fue muy lluvioso y, para entonces, las hojas estaban ya plenamente desarrolladas. La cuenca del arroyo evacuó durante el período de lluvias el equivalente a unos 59 litros por metro cuadrado y año. Las pérdidas anuales determinadas en la cuenca fueron insignificantes en comparación con las entradas al ecosistema forestal.

Las concentraciones en bioelementos del río Hondo son más bajas que las del arroyo, aunque sus valores convergen una vez se han estabilizado las concentraciones en este último tras las lluvias después de un período seco. La concentración de carbono orgánico del arroyo y del río Hondo son normalmente inferiores a 5 miligramo por litro. Las lluvias, tras un período seco prolongado, originan fuertes picos en el arroyo, con altos valores en carbono orgánico, nitrógeno y fósforo, por la acción conjunta de lavados de polvos y de partículas edáficas, para caer hasta valores usuales cuando continúan las precipitaciones. La influencia del polvo atmosférico se evidencia por el paralelismo que siguen todas las concentraciones de las diferentes aguas del ecosistema. Un balance global para ese año de 1997 indica que las mayores ganancias absolutas obtenidas en el ecosistema forestal de Navasfrías son de 93, 52, 36, 26 y 15 kilogramos por hectárea y año de carbono orgánico, cloruro, nitrato, sodio y calcio, correspondiendo las menores a la de cationes ácidos hierro, manganeso y aluminio.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

POLLUTANT TRANSPORT AND FATE IN ECOSYSTEMS. P. Coughtrey, M. Martin y M. Unsworth, Blackwell, Oxford, 1987.

BIOGEOCHEMISTRY OF AN OAK WOODLAND ECOSYSTEM IN THE NETHERLANDS AFFECTED BY ACID ATMOSPHERIC DEPOSITION. N. Van Breemen, W. F. J. Visser y T. H. Pape, Agric. Res. Repport PUDOC, Wageningen, 1989.

DEGRADACIÓN Y REGENERACIÓN DEL SUELO EN CONDICIONES AMBIENTALES MEDITERRÁNEAS. J. Albadalejo, M. A. Stocking y E. Díez. C.S.I.C., Madrid, 1990.

BIOGEOQUÍMICA DE ECOSISTEMAS. J. F. Gallardo, Consejería de Medio Ambiente, Valladolid, 1994.

Las tinturas naturales

Sustituidas por los colorantes artificiales desde hace un siglo, las tinturas naturales vuelven a despertar el interés de industriales, químicos y arqueólogos

Dominique Cardon



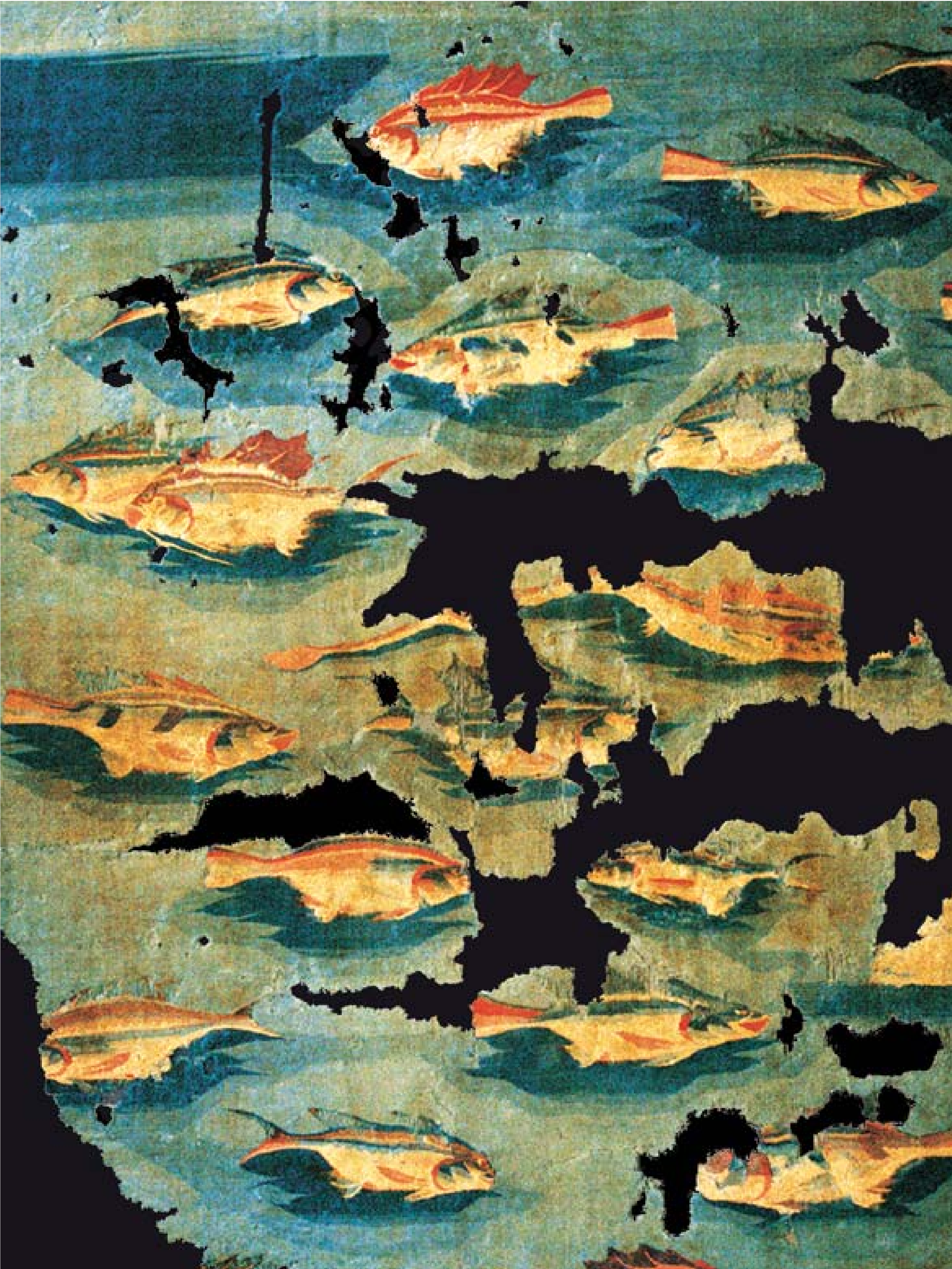
En 1856, el joven químico inglés William Perkin se propuso fabricar un medicamento contra la malaria a partir del alquitrán de hulla. Fracasó en su intento. Sólo consiguió una sustancia violácea. El producto, la malveína, iba a iniciar una larga serie de colorantes artificiales que terminarían por sustituir a los naturales.

Antes de este acontecimiento fundamental en la historia de los tintes, para comunicar a las fibras textiles diversos colores estables y diferentes de los que tienen por naturaleza, las tinturas eran de origen vegetal y animal. Estos colorantes diferían de los utilizados en pintura en que, amén de adherirse a una superficie, debían ser solubles a fin de impregnar íntimamente las fibras.

Los colorantes artificiales acabaron por imponerse, pues podían fabricarse a bajo precio. Pero hoy los colorantes naturales han recuperado de nuevo su interés. La industria de las pinturas, cosmética, textil y papelera, así como artistas, artesanos y diseñadores de alta costura vuelven a los colorantes naturales; la agricultura ve en ellos un proyecto de futuro. Por su parte, los arqueólogos aprovechan los avances del análisis químico aplicado a los tejidos antiguos; con el estudio de los tintes naturales e iden-



1. ESTE FRAGMENTO DE TUNICA, conservado en la iglesia de Valère, en Suiza, fue probablemente tejido en Bizancio o en Siria en el siglo XI. La célebre *Tintura de los peces* (*derecha*), conservada en el Museo del Tejido de Lyon, es del siglo III. Estos dos tejidos dan fe de la maestría y la sensibilidad de los tintoreros que usaban colorantes de origen vegetal y animal. En la antigüedad se explotaban los caparazones de *Murex*: se seccionaba la concha para extraer una substancia incolora precursora del púrpura. Este precursor viraba hacia el violeta-rojo cuando se exponía a la luz. Se necesitan 10.000 moluscos para obtener un gramo de pigmento.













tificación de las que han permanecido en los tejidos arqueológicos se enriquece nuestra visión del pasado.

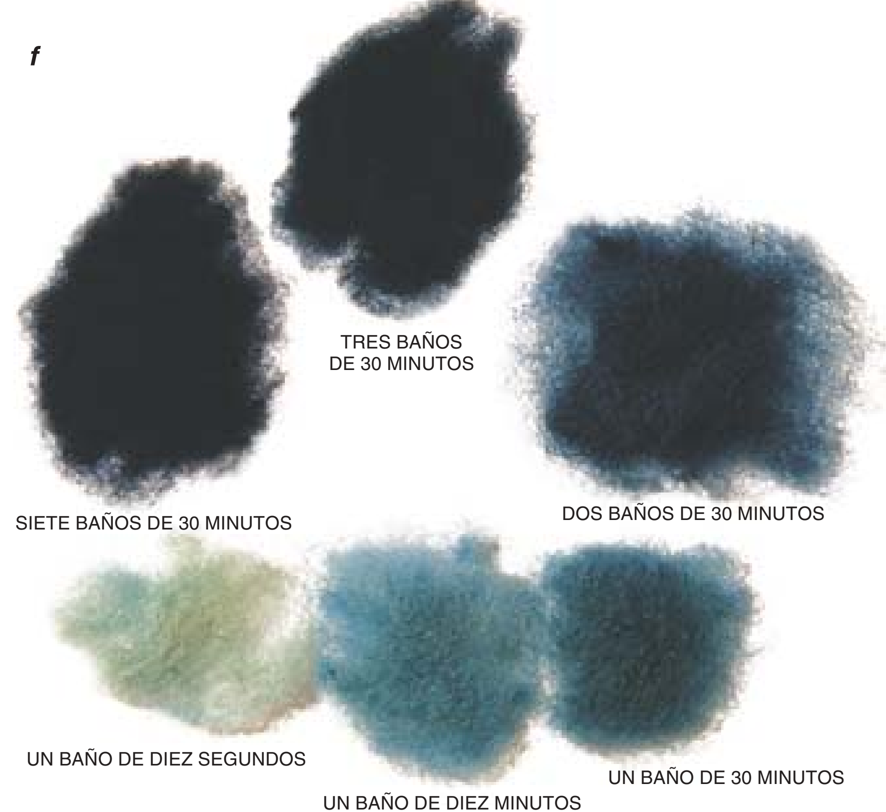
Tras esbozar a grandes rasgos la historia de los colorantes naturales y sintéticos, abordaremos el análisis de los restos del "Conde del año Mil", uno de los primeros condes de Tolosa, encontrado en un sarcófago en 1996, durante los trabajos de restauración de una capilla exterior de la basílica de Saint-Sernin de dicha capital.

En la conquista de los colores se alternan períodos de estabilidad, en que los progresos son lentos y el número de materiales utilizados permanece estacionario, con súbitas revoluciones producidas por la irrupción de nuevas tinturas procedentes de países lejanos o fabricadas por el hombre.

Una historia llena de colores

Hasta la aparición de las tinturas sintéticas, los pueblos de todas las civilizaciones habían coloreado los tejidos con tintes asequibles en su propio entorno, obtenidos a través de la guerra, el trueque o el comercio. Con la excepción de algunas arcillas, el reino mineral ofrece pocas substancias tintóreas. Sin embargo, proporciona sales metálicas, los mordientes, como el alumbre (sulfato de aluminio y de potasio), utilizado para aumentar la afinidad de las fibras textiles con los colorantes a través de un mecanismo todavía poco estudiado. El alumbre se adhiere a las fibras y favorece la fijación de las moléculas colorantes.

El mundo vivo sí aporta una fascinante variedad de colores: los moluscos estenoglosos del género *Murex*, la cochinilla, las hierbas, las flores, los frutos, las raíces, los arbustos, los líquenes, las algas y los hongos son fuentes de una infinidad de tonalidades púrpura, violetas, rojas, azules, amarillas, etc. Los museos del mundo entero conservan obras de arte textil antiguas que ilustran la belleza y la estabilidad de los tintes naturales.



2. EL CICLO DEL PASTEL (*izquierda*). Las hojas de la hierba pastel (*a*) se recolectan, con la excepción de algunas plantas que proporcionarán las semillas en la época de floración (*b*), un año después de la siembra. Las hojas se trituran y se forman bolas, las *cucañas* (*c*), que fermentan gracias a bacterias y al oxígeno del aire. Las cucañas se trituran de nuevo y fermentan otra vez para formar el pastel "agranat" (*d*), que se disuelve en cubas (como las descubiertas en Nimes, llenas de agua alcalinizada con cenizas o cal (*e*). Las fibras se lavan las veces necesarias hasta obtener el color deseado (*f*).

Pero a lo largo del siglo XIX, la expansión de la industria textil occidental, insaciable consumidora de colorantes, obligó a buscar nuevas fuentes tintóreas. La tala masiva de maderas tintóreas en los bosques tropicales y la casi desaparición de la morera de tintoreros, en Colombia, y del palo de Brasil en el país cuyo nombre proviene de ese árbol tintóreo, es una de las más espectaculares manifestaciones de la explotación masiva de los colorantes naturales. Otros ejemplos se dieron en la India e Indonesia, donde la dedicación de millones de hectáreas al cultivo del índigo en detrimento de plantaciones alimentarias provocó la sangrienta revuelta del índigo en Bengala a finales del siglo XIX. Los químicos se afanaron en la búsqueda de colorantes de substitución.

Con la invención de los colorantes sintéticos se resolvía un problema mundial de abastecimiento. Sin embargo, cada nueva conquista de la química implicaba el abandono de una familia de colorantes naturales y, con ello, el hundimiento de una economía basada en su producción, transformación, transporte y comercialización. Las transferencias internacionales cambiaron de signo. Así, en 1896, había en la India 1.683.328 hectáreas de indogoferas; 60 años más tarde, sólo quedaban 4289. En 1897, Alemania importaba anualmente 1400 toneladas de índigo natural, pero ya exportaba 8700 toneladas de índigo sintético en 1904.

Este triunfo de los tintes sintéticos ha venido asociado a un largo período de desinterés por los colorantes naturales. Ni siquiera hoy conocemos todas las moléculas colorantes de las plantas, moluscos o insectos que se emplearon desde tiempos prehistóricos.



3. DIVERSOS VEGETALES Y ANIMALES de diferentes partes del mundo contienen moléculas colorantes: la cochinilla de América (*a*), la morera de los tintoreros (*b*), el índigo (*c*), la gualda (*d*), la cochinilla de Armenia (*e*), el *suranji* (*f*) y la *Mancinella bufo* (*g*).

Un oasis de resistencia

Ello no obstante, la sensibilidad de algunos artistas y el apego de ciertos pueblos a las técnicas de sus antepasados han evitado que este patrimonio cultural cayera en el olvido. Los etnólogos y los historiadores de la ciencia y de la técnica han descrito, sobre el terreno o en los archivos, las recetas y los procedimientos tintóreos de épocas diversas y países distintos.

El conocimiento de la química de las plantas tintóreas también progresa, ya que algunos grupos de colorantes tienen propiedades medicinales. Por citar un caso, los flavonoides amarillos se usan contra el cáncer o para proteger los vasos sanguíneos.

Desde hace 30 años, coincidiendo con la aparición del movimiento hippie y el ecologismo que sintieron fascinación por lo natural y lo exótico, torna a florecer el interés por los colorantes naturales. Interés que se traduce en exposiciones sobre tinturas de relieve histórico, como la dedicada al índigo en Marsella en 1987; en las obras de síntesis sobre la historia y la química de las tinturas naturales; en congresos internacionales donde se reúnen químicos, historiadores, industriales, tintoreros, etnólogos y otros.

En uno de estos últimos organizado en Tolosa en 1995, al que acompañaba una exposición de obras de arte textil y pictórico contemporáneas, realizadas con colorantes y pigmentos naturales, reconstruimos, a partir de un tratado técnico florentino de 1418, la cuba de tintura al pastel: la planta de la que se extraía el color azul y fuente autóctona de índigo en Europa. Las hojas del pastel se recolectaban en el primer año de siembra. Algunas plantas se dejaban sin arrancar para que echaran flor y fruto, cuyas semillas aseguraban la continuidad de la plantación. Para extraer los colorantes, las hojas de pastel se trituraban hasta obtener una pasta con la que se hacían unas bolas llamadas cucañas, por fermentación. Para teñir, se utilizaba el pastel "agranat" obtenido triturando las bolas en un medio húmedo, donde fermentaban de nuevo. Gracias a esas fermentaciones aeróbicas, los precursores incoloros de la planta se transformaban en indigotina coloreada. En la cuba tintórea el pastel "agranat" se disolvía en un medio alcalino de cenizas graveladas (que contienen potasa) o de cal. Se lavaban los tejidos; al salir de la cuba, el oxígeno del aire hacía precipitar los colorantes en la superficie y en el interior de las fibras. La intensidad del tinte obtenido —de claro a muy intenso— dependía del número de baños que se aplicara.

Citemos otro signo de renovación. Desde hace algunos años, las cochinillas de los cactus se cultivan de nuevo en la provincia mexicana de Oaxaca. De estos insectos de la familia de los Cóccidos, se extrae una tintura escarlata, único colorante animal y uno de los pocos colorantes rojos autorizados en alimentación y farmacia por la legislación europea y norteamericana.

Este retorno a las tinturas naturales no concierne sólo a los historiadores. Presagia también futuros desarrollos económicos.

Importantes retos económicos

En Europa, la recuperación del cultivo intensivo de plantas tintóreas asequibles podría evitar el barbecho de los campos de labor. Existe ya

DOMINIQUE CARDON se halla adscrita al Laboratorio de historia y arqueología del mundo cristiano y musulmán medieval del CNRS, en Lyon.

un programa de investigación europeo sobre el cultivo y la extracción de tintes naturales asociado al Departamento de Agricultura del *Land* alemán de Turingia y el Instituto de Investigación Agronómica de Bristol.

Experiencias similares se han acometido y continúan desarrollándose en Italia y Francia. En esta última, con participación de la Sociedad *Bleu de Lectoure* y de cooperativas agrícolas del sudoeste galo, el Centro de aplicación y tratamiento de los recursos agrarios de la Universidad de Tolosa ha iniciado la extracción industrial de índigo a partir del pastel. En Provenza, en la primavera de 1999, la asociación *Filières colorants naturels* cultiva granza, centidonia, gualda y serrátula, plantas tintóreas. Tales ensayos, necesariamente interdisciplinares, se han centrado en un puñado restringido de especies, escogidas entre las garantizadas por la propia historia de la tintura. Compete a la genética botánica mejorar la producción a través de la selección de variedades según rendimiento, concentración en materia colorante o en precursores, y de acuerdo con su adaptación a diversos suelos y climas.

En los países en vías de desarrollo, el cultivo de plantas tintóreas se ha convertido en fuente de ingresos para poblaciones rurales, sobre todo cuando se integra en un proceso de producción textil que privilegia las técnicas tintóreas tradicionales y los colores de la cultura popular. El valor añadido adquiere aquí notable importancia.

Así viene ocurriendo, desde los años ochenta, en el marco del proyecto *Dobag*, que cuenta con el apoyo de la Universidad de Estambul: los tejedores turcos agrupados en una cooperativa autónoma y apadrinada por la reina de Noruega sólo utilizan lanas hiladas a mano y tinturas vegetales locales. Sus tapices son comprados por una clientela internacional sensible a la riqueza de sus tonos. Los colorantes naturales llevan camino de convertirse en materias primas del futuro.

Las tinturas en la historia

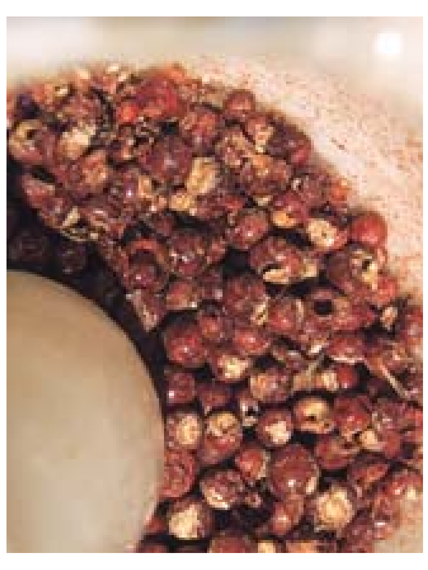
Además, las tinturas constituyen fuentes valiosas de información sobre el pasado. Presentes en los tejidos antiguos, numerosos tintes naturales proporcionan a menudo indicios sobre el lugar y la fecha de fabricación de aquéllos, amén de aportar datos sobre el comercio internacional vigente en cada época, sin olvidar el estatuto social y los gustos indumentarios de individuos y grupos.

El estudio histórico de tinturas antiguas requiere métodos de trabajo muy diversos; reclama también la colaboración entre historiadores, bioquímicos y químicos. Desde mi laboratorio de historia y arqueología medieval mantengo una larga relación investigadora con el Laboratorio de botánica y fitoquímica de la Facultad de Farmacia de Montpellier y con el Laboratorio de investigación sobre monumentos históricos de Champs-sur-Marne. Se empieza por la búsqueda y estudio de recetas antiguas de tintes, a fin de identificar los colorantes más utilizados en cada época y en cada región del mundo. La contribución de las ciencias humanas es indispensable; sépase que algunas recetas que tienen más de 2500 años se conservan en tablillas de arcilla de escritura cuneiforme; el desciframiento de las tablillas marca el primer paso que determina la investigación. Se recogen entonces las plantas y los animales tintóreos mencionados en las recetas para reproducirlas. Por comparación con las muestras así obtenidas, se identifican las tinturas antiguas.

Paralelamente, los bioquímicos caracterizan la composición de las plantas o los animales tintóreos que se fijan en los tejidos. Son comparaciones a veces difíciles, ya que los colorantes se degradan con el paso del tiempo, pero los químicos han adaptado sus protocolos analíticos al estudio de fibras arqueológicas. Se consigue a menudo identificar las tinturas en tejidos que parecen estar completamente quemadas, para luego reconstruir los colores originales.

Entre las técnicas cromatográficas de identificación más empleadas des-







4. EL *KERMES* DE LOS TINTOREROS es un parásito de ciertos robles. Las hembras mueren y se convierten en pequeñas bolas grises en las que los huevos fecundados se desarrollan antes de la eclosión (*izquierda*). Pero hay que cazar las hembras adultas antes de la eclosión de los huevos, en mayo; después se trituran a razón de alrededor de 70 insectos por gramo de tintura escarlata (*centro*). El manto de Notre-Dame de la Victoire de Thuir (*derecha*), del siglo XII, fue teñido con ese colorante.

5. LAS MEDIAS del “Conde del año mil”, recuperadas en un sarcófago de Tolosa, fueron teñidas con unos 50.000 insectos del género *Kermes*.

taca la cromatografía líquida de alta resolución, que separa los componentes de una mezcla según su afinidad con el eluyente. Estas técnicas permiten analizar un fragmento de hilo de una decena de milímetros de longitud: cuando se alcanza tal precisión, se pueden distinguir moléculas colorantes químicamente muy próximas, así como los diferentes componentes de tinturas obtenidas en diversos baños tintóreos.

No obstante, algunos tejidos son demasiado valiosos como para arriesgarse a la extracción de muestras. El Centro Ernest Babelon, de Orleans y el Laboratorio de Espectroscopía infrarroja y Raman, en Thiais, utilizan técnicas no destructivas de análisis espectrométricos que identifican las tinturas sin merma del original ni traslado de las piezas.

Cada nuevo análisis de colorantes antiguos supone un cambio en nuestra visión de las culturas que nos han precedido. A este respecto, un grupo de investigadores japoneses han descubierto que un fragmento de tejido de seda pegado a un brazalete de nácar del siglo primero antes de Cristo estaba teñido con púrpura extraído de un molusco del mar del Japón. Este minúsculo fragmento, recuperado de una de las 2500 urnas funerarias de los túmulos de Yoshinogai, en la isla de Kyushu, revela que el interés por el púrpura se remonta a esa época, desde la protocivilización Yayoi al mundo romano. Más recientemente, estas técnicas nos han permitido analizar las fibras textiles de los restos de uno de los primeros condes de Tolosa.

El “Conde del año Mil”

En 1996 y en el curso de los trabajos de habilitación de un aparcamiento al lado de la basílica tolosana de Saint-Sernin, se halló en una capilla exterior un sarcófago que contenía los restos, según los historiadores, del padre (Raimond III Pons) o del abuelo (Raimond II) de Guillermo III Tallaferro (947-1037), conde de Tolosa. Los arqueólogos Eric Crugézy y Christine Dieulafait estudiaron *in situ* el contenido. Limpiados los restos por la restauradora Danielle Nadal, los vestigios del traje funerario me fueron confiados. Los fragmentos de tejidos eran de cinco tipos: dos telas de lino sin teñir, de distinta finura; una sarga de lana de color marrón o marrón rojizo; un tejido de una túnica cuyos hilos de la urdimbre, de lino, y los de la trama, de algodón, dibujaban una textura romboidal; y muchas bridas muy finas de seda, casi negras.

El tejido de la túnica, una vez mojado, desprendía un líquido amarillo, pero no ha podido identificarse ningún tinte. El motivo romboidal, típico de los gustos predominantes entre la aristocracia carolingia que reinaba entonces en la Europa Occidental, es un legado germánico y celta, mientras que la técnica de tejido estaba ampliamente difundida en el mundo islámico, que en esa época se extendía hasta España. El tejido nos revela, pues, que la región se encontraba en la encrucijada de dos mundos.

La sarga de lana torcida forma parte de un par de medias que llegaban hasta los muslos del difunto y que se han conservado bastante enteras. Un primer análisis de una muestra extraída de una parte todavía roja, realizado por Penelope Rogers, del Centro de investigaciones textiles de York, revela que se trata de una tintura de origen entomológico. Los análisis complementarios realizados por Jan Wouters, en el Instituto Real del Patrimonio Artístico de Bruselas, han confirmado la presencia de ácido carmínico, constituyente mayoritario de la tintura extraída de insectos *Kermes*, de la familia de los Kermidae. A pesar del aspecto pétreo de las trizas quemadas, esparcidas en el sarcófago, la finura excepcional de las telas de lino, las bridas de seda y, sobre todo, los calzones, cuya tintura —la más cara de la Europa medieval— ha requerido el sacrificio de al menos 50.000 insectos, prueban el carácter suntuoso del traje del conde.

Para sacar esa tintura “carmesí”, hay que cazar hembras adultas en mayo; muertas, proporcionan miles de huevos fecundados que se desarrollan en su cuerpo. Secados, los insectos se pulverizan en un mortero, y después se vierten en agua hirviendo. Según las recetas antiguas, el peso del polvo colorado debía ser como mínimo igual al peso de la lana que se pretendía colorear, para así obtener un rojo vivo, llamado escarlata. Previamente, las fibras de lana han sido desengrasadas, hervidas en una solución de alumbre a razón del 20 % de lana seca. Después de aplicar el mordiente, las fibras se sumergían en el baño tintóreo que se llevaba a ebullición.

El monopolio de las tinturas sintéticas ha seguido su propia dinámica sin los tintes naturales. Pero hoy coexisten las dos fuentes de color. Los colores sintéticos de los químicos responden a una producción textil masiva destinada a vestir a una población mundial creciente, mientras que las tinturas naturales componen otra paleta y proporcionan satisfacciones a sus consumidores, sensibles a la belleza única de los colores, y a los historiadores que saben recuperarlos del olvido.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

GUIDE DES TEINTURES NATURELLES. Dominique Cardon y Gaëtan du Chatenet. Delachaux et Niestlé, 1990.

LE SECRET DES COULEURS. (CD-Rom). Editions Carré Multimédia, 1997.

DES TEINTES ET DES COULEURS. Musée National des Arts et Traditions Polulaires, Réunion des Musées Nationaux, 1998.

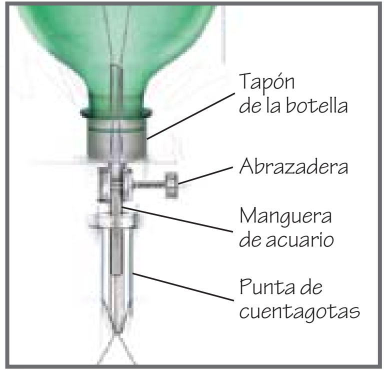
LA DRAPERIE MÉDIÉVALE EN EUROPE. Dominique Cardon, CNRS Éditions, 1999.

Shawn Carlson

Turbulencia en dos dimensiones

Maarten A. Rutgers crea películas jabonosas de una altura de tres pisos. No sólo para divertirse. En varios de los enigmas más difíciles de la física actual intervienen fluidos turbulentos. Los físicos acostumbran ensayar con sistemas bidimensionales, más sencillos, antes de abordar los problemas tridimensionales del mundo real. Rutgers, profesor universitario, conoce a fondo los fluidos de dos dimensiones. Por eso me sentí muy honrado cuando vino a mi laboratorio doméstico para enseñarme sus secretos y construir una versión a escala de laboratorio.

El método de Rutgers es ingenioso y sencillo. Sitúa un depósito de solución jabonosa encima de dos monofilamentos, o sedales de una sola hebra de 10 o 12 kg, estirados, y deja que la gravedad arrastre la solución sobre ellos. Una vez humedecidos, separa poco a poco los filamentos con cuatro hilos finos. Entre los filamentos se forma una película jabonosa muy fluida y uniforme. Cuando humedece algo pequeño, un mondadientes por ejemplo, y hurga con él dentro del flujo, aparecen vórtices en la estela del objeto. El resultado es una impresionante exhibición de movimiento turbulento en dos dimensiones. Ya he pasado horas rumiando acerca de las complejas interacciones entre los patrones de turbulencias que he creado con mondadientes, peines y filos de cuchillos.



1. De manera muy original este aparato crea películas jabonosas planas. La solución jabonosa desciende desde una botella de soda de plástico puesta boca abajo, por dos monofilamentos, hacia un embudo. Cuatro hilos horizontales mantienen separados los filamentos

Una botella de soda de dos litros, suspendida boca abajo, constituye un depósito idóneo para el jabón. En el fondo, se abre un orificio de buen tamaño (para reponer la solución) y dos orificios de poco diámetro (para tender los monofilamentos). La solución fluirá por el tapón de la botella a través de un trozo de 5 cm de tubo de silicona blanda, que venden en las tiendas de artículos para acuarios. En el tapón se abre un orificio de un diámetro algo mayor que el diámetro interior del tubo. La punta de éste se recorta en pico de flauta y se pasa el tubo por el orificio. Se conseguirá así un cierre estanco; si no, con un poco de pegamento de acuario lo tendremos.

La botella cuelga de un corto trozo de monofilamento, de unos 30 cm, tendido a través de los orificios pequeños. Un segundo trozo de monofilamento, de 4 m de largo, guía la solución jabonosa. Este trozo se dobla por la mitad, los dos extremos se pasan por los dos orificios y se les saca al exterior a través del tubo. En ese momento, puede volver a atornillarse el tapón a la botella. Para controlar el flujo de solución por el tubo, sujétese a éste una abrazadera de manguera. Para suavizar el flujo cuando llega al filamento, Rutgers desliza una punta de pipeta desechable sobre el extremo del tubo, pero puede emplearse también el cuello de un cuentagotas de plástico. Quizá deba recortarse la punta para que el fluido se mueva lo bastante rápido para mantener la película.

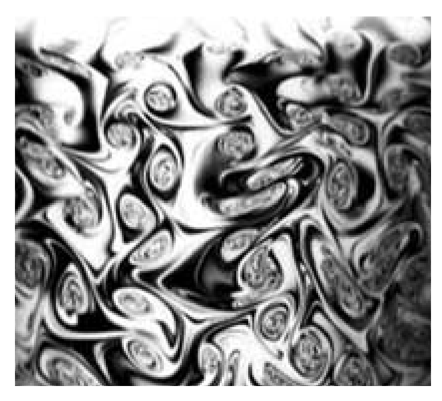
Suspendimos de una viga de mi taller el conjunto, pero Rutgers recomienda un armazón de madera que pueda apartarse fácilmente y utilizarlo en otra ocasión. Los monofilamentos se mantienen tensos merced a una cinta de caucho larga y sujeta a la parte inferior. Se atan las dos hebras y se pasan a través de un pequeño embudo de plástico; luego, se atan a la cinta de caucho. Un tubo de plástico desagua la solución desde el embudo hacia un recipiente; podría también dejarse que gotee sobre una toalla o un caldero.

Por último, se toman cuatro trozos de hilo fino de unos 50 cm de largo y se sujeta un clip a un extremo de cada uno. Atense los otros extremos a los monofilamentos. Para crear la película, se juntan los filamentos y se abre la abrazadera con el fin de que se empapen a fondo. Luego, des-

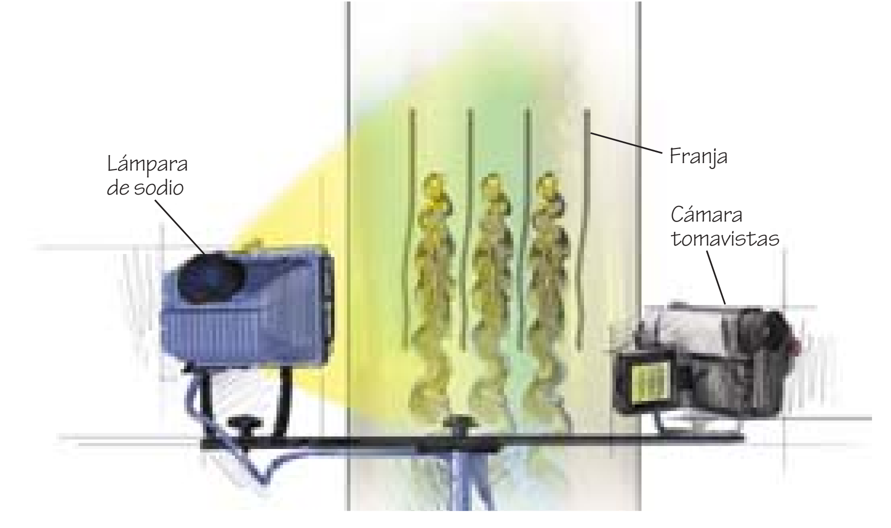
pacio, se separan los filamentos tirando de los hilos y se aseguran los clips sobre escarpias atornilladas al armazón de madera. Se obtiene así una película de gran sección recta por la que fluye la película con una velocidad casi constante. Si se abre la abrazadera, aumenta la velocidad. Durante los experimentos, la película se rompe muchas veces, y para regenerarla hay que repetir este procedimiento.

La mezcla ideal para formar película es una solución al 1 a 2 por ciento que se consigue combinando una o dos partes de jabón líquido lavavajillas puro con 100 partes de agua. Hay que evitar los fluidos formadores de pompas. La vida de éstas se halla limitada por la gravedad que arrastra el fluido desde la parte superior hasta que revienta la pompa. Por eso, los fabricantes de juguetes añaden glicerina para aumentar la viscosidad de la solución. Pero viscosidad es lo último que necesitamos si queremos estudiar turbulencias, ya que una alta viscosidad amortigua el movimiento turbulento.

La película jabonosa fluye a 0,5 a 4 metros por segundo, demasiado rápida para observar con la vista unos vórtices de un tamaño milimétrico. Además, la turbulencia sólo puede verse bajo una luz de gran contraste. Se requiere una luz estroboscópica o una videocámara con "obturador deportivo", que limita cada exploración entre 1/1000 y 1/10.000 segundos. La mayoría de los nuevos tomavistas ofrecen esa propiedad. Pueden también tomarse unos magníficos fotogramas con un obturador rápido y película de alta velocidad. Rutgers recomienda película en blanco y negro (para el mejor contraste) ASA 3200 y una velocidad de obturación de 1/2000 o más.



3. Este ensanchamiento del giro de los vórtices se debe a un obstáculo en la película jabonosa



2. Un montaje fotográfico especial, con una luz monocromática y una videocámara de acción rápida, puede tomar imágenes como la que se muestra en la figura siguiente

La fuente luminosa debe ser lo bastante intensa para compensar la rapidez del obturador. El mejor modo para conseguir un alto contraste es emplear luz monocromática. Rutgers utiliza una lámpara de sodio de baja presión, que genera una intensa banda de luz amarilla de una longitud de onda de unos 585 nanómetros. Como prácticamente toda la energía se invierte en una sola longitud de onda, no hace falta una bombilla de alta potencia. Una bombilla hembra de 18 watt es muy luminosa. Por desgracia, requiere un portalámparas con un equilibrador, algo caro. Esos portalámparas pueden encontrarse en los almacenes de alumbrado industrial. Hará falta un proyector dotado de un montaje de muñones que pueda instalarse en un trípode.

Como alternativa a la iluminación especial, Mike Rivera sugiere añadir leche en polvo a la solución jabonosa. Detrás de la película lechosa se coloca una tela negra y se ilumina el montaje con una lámpara intensa cualquiera. La película lechosa dispersa más la luz allá donde es más espesa, lo cual puede dar un contraste suficiente para mostrar lo que ocurre. He observado la turbulencia con esta técnica, pero los resultados no alcanzan la calidad de la luz de sodio. Puede que una cucharada de pintura blanca dé buen resultado.

La energía reflejada llega a la cámara desde la cara frontal y desde la cara dorsal de la película jabonosa. Ambos trenes de luz se interfieren formando franjas (bandas claras y oscuras espaciadas cuya separación es inversamente proporcional al espesor de la película). Rutgers consigue a menudo una superficie uniformemente luminosa, lo que significa que la variación en el espesor de la película es inferior a 100 nanómetros. Pero lo mejor que yo he logrado son seis franjas. Las corrientes turbulentas retuercen las franjas, haciendo visibles los patrones de flujo, a la manera del humo en los túneles de viento.

Pruébense dos experimentos sencillos. Un obstáculo cilíndrico, tal como un mondadientes, despide parejas de vórtices de giros contrarios. Cuando se colocan dos mondadientes juntos, el vórtice izquierdo del mondadientes derecho y el vórtice derecho del mondadientes izquierdo se repelen. ¿Se puede descifrar de qué modo varía la fuerza entre esos dos objetos con la separación entre ambos? También puede experimentarse con ondas de choque. Abrase la abrazadera hasta que la velocidad de flujo cree una onda curva, como la estela de una lancha, en torno al mondadientes. Esa onda se mueve hacia los lados, pero al encontrar un fluido que se mueve más lento, se refleja dibujando un rombo.

Me he entretenido examinando el flujo en torno a hojas de cuchillo y a través de las púas de un peine. Y me he deleitado reproduciendo un experimento efectuado por Jun Zhang. Atese un extremo de un hilo de seda a un mondadientes y déjese serpentear el hilo dentro de la corriente. El movimiento del hilo es similar al de la cola de un pez al nadar.

Para más información, visite la página Web de Society for Amateur Scientists en sas.org y haga clic en el botón "Forum". Como servicio a los aficionados, SAS pone a su disposición paquetes de tres puntas de pipeta por dos dólares hasta mayo de 2001. Puede escribirse a la sociedad a 4735 Clairemont Square, PMB 179, San Diego.

Ian Stewart

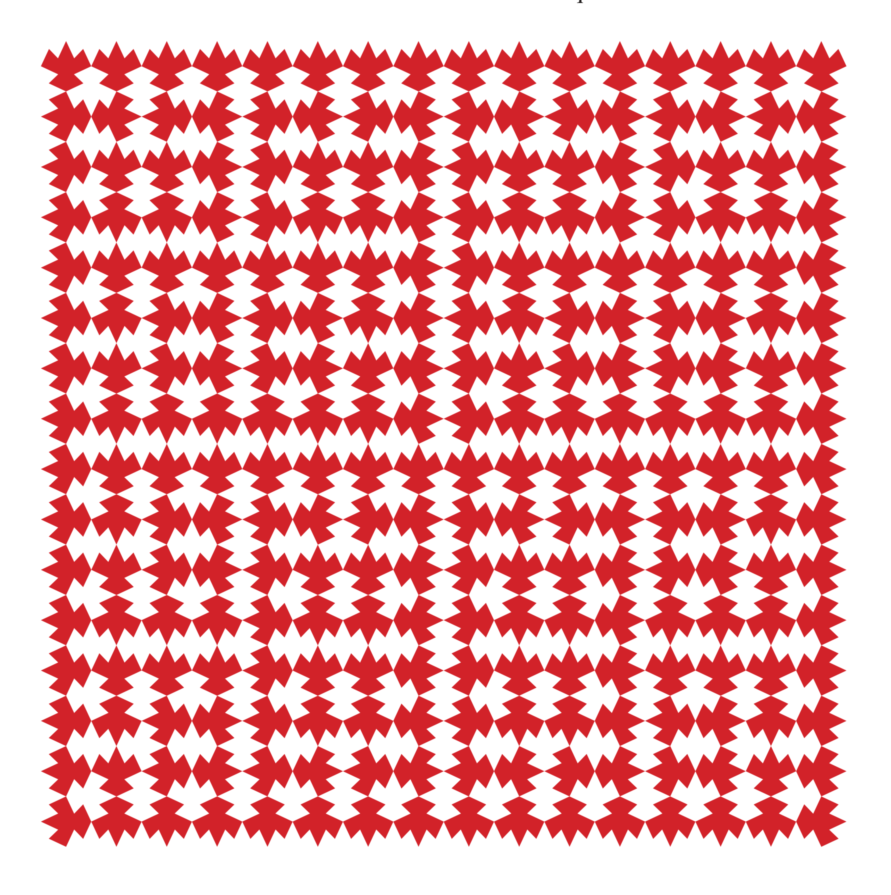
Mosaicos iterativos no periódicos

Las teselaciones —mosaicos o pavimentos— han sido, desde siempre, tema favorito de las matemáticas recreativas. La tarea habitual consiste en partir de una o varias figuras prefijadas —las losetas o teselas— y adosarlas de modo que recubran el plano infinito o, al menos, parte del mismo. Los artistas se han valido de este método para crear hermosos diseños, algunos de los cuales he tenido el placer de presentar ya. Michel Châtelain me dio a conocer un método totalmente diferente, en el cual la forma de la loseta es con mucho lo último que aflora. En el nuevo procedimiento se empieza determinando el modo en que han de quedar adosadas las losetas, y después se averigua cuál será la forma adecuada para la tesela.

Tomemos un solo cuadrado. Aunque podemos pavimentar un plano con cuadrados —los azulejos del cuarto de baño— lo que deseamos entraña, en sentido literal, un giro. En la figura 1 se indica la forma de adosar cuatro cuadrados para crear un cuadrado mayor; he añadido los perfiles en L para indicar que uno de los cuatro componentes ha sido trasladado (es decir, desplazado hacia un lado) y que los otros tres son resultado de aplicar al primero un giro, una simetría (que invierte la orientación de la loseta) o ambas operaciones. Los giros, las simetrías y las traslaciones reciben el nombre colectivo de transformaciones: especifican formas de mover el cuadrado dentro del plano. Efectuando de nuevo las cuatro transformaciones anteriores con la figura de cuatro cuadrados resulta la configuración de 16 cuadrados representada en rojo. (La figura de 4 cuadrados pasa a ser el cuartel superior izquierdo del cuadrado grande; los otros tres cuadrados están generados a partir del primero mediante giros y simetrías.)

Este proceso se puede iterar cuanto se quiera, con lo que se obtienen motivos con 64 cuadrados, con 256, etc. Además, cada una de las sucesivas formaciones queda integrada en la siguiente, lo que permite encajar la secuencia infinita de teselaciones en una configuración infinita. Según se proceda, el resultado puede pavimentar el plano entero o alguna región infinitamente grande de él. Por ejemplo, si cada teselación parcial se sitúa siempre en el ángulo superior izquierdo de la siguiente, recubriremos un cuadrante infinito, una cuarta parte del plano. Si la colocamos alternativamente en la posición superior izquierda y en la inferior derecha, llegaremos a pavimentar el plano entero. Tal vez quiera el lector averiguar cómo pavimentar un semiplano (dos cuadrantes contiguos).

Los cuadrados marcados con la L, no son, empero, las losetas que realmente deseamos crear. Son meros marcadores para las losetas, indicadores del conjunto de transformaciones que acabarán generando el teselado definitivo. Para hallar la posible forma de loseta que encaje consigo misma según las transformaciones elegidas, se selecciona una "generatriz": una curva que corra desde el ángulo inferior izquierdo del cuadrado ini-



1. En el nuevo método, la teselación empieza, por ejemplo, con una composición de 4 cuadrados (arriba) *en la cual el cuadrado superior izquierdo es trasladado (desplazado lateralmente), el cuadrado superior derecho es reflejado, el cuadrado inferior izquierdo es girado, y el inferior derecho, girado y reflejado. Las mismas transformaciones engendran, por repetición, una configuración con 16 cuadrados. Si se aplican las transformaciones a una curva en N, resulta una loseta que recuerda a un pájaro* (arriba) *que encaja en el mismo patrón* (a la derecha)

cial hasta su ángulo superior derecho. (Esta condición garantiza que la loseta sea de forma cerrada.) La curva de la figura 2 es un zigzag en N. Sometamos esta generatriz a las cuatro mismas transformaciones que hemos aplicado a las figuras cuadradas, colocando la curva original en el ángulo superior izquierdo, girándola y reflejándola para producir tres curvas conectadas.

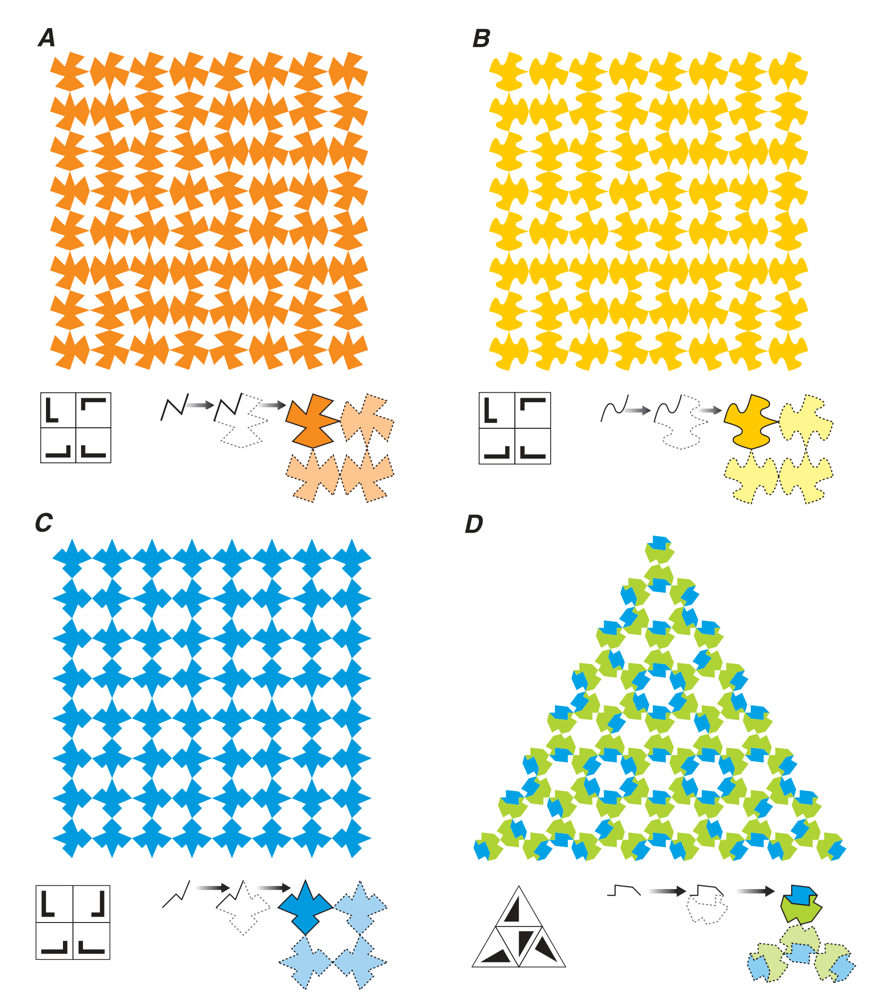
Con esta elección de curva generatriz obtenemos una tesela que recuerda a un ave. Podemos ahora aplicar las transformaciones a esta loseta, como se hizo con el cuadrado original, y repetirlas muchas veces. El resultado constituye un método para recubrir una parte cualquiera del plano con una infinidad de copias de esta interesante loseta.

En la figura 2 vemos otras pavimentaciones producidas por el mismo método. Si se utiliza la generatriz en forma de N, pero distinto conjunto de cuatro transformaciones, se obtienen losetas y motivos diferentes (*A*). Por otra parte, si se cambia la forma de la generatriz, se obtienen losetas diferentes que encajan en el motivo anterior (*B*). Obsérvese que ciertas generatrices producen más de una loseta (*C*).

Las configuraciones resultantes son, por lo general, aperiódicas: no son meras repeticiones de una figura. Pero si el conjunto de transformaciones consta sólo de traslaciones (o, con otras palabras, si no se utilizan giros ni simetrías), también se pueden obtener teselaciones periódicas. Basta dibujar una figura con cuatro cuadrados cuyas L se hallen todas en la misma orientación; toda teselación producida por estas transformaciones será periódica.

Además de los cuadrados, el proceso de pavimentación puede partir de otras unidades básicas. Se puede utilizar cualquier "reptesela" (*rep-tiles*, las llamó Golomb, su inventor) es decir, una loseta tal que adosando varias copias suyas se pueda obtener otra loseta que presente su misma forma, aunque mayor tamaño. Un triángulo equilátero, por ejemplo, es una reptesela, pues cuatro ejemplares reproducen un triángulo equilátero de tamaño doble, capaz de generar configuraciones notables (*D*).

El mismo método funciona también en tres dimensiones. Con ocho cubos se puede construir otro de tamaño doble, por lo que el cubo es un "repetedro" (voquible que acabo de acuñar). Se pueden crear incluso teselas fractales.

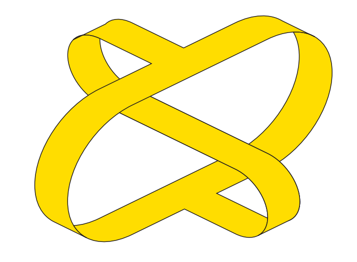


2. Se obtiene una panoplia de motivos cambiando los puntos de partida del procedimiento de teselación. Al aplicar a la generatriz en forma de N diferentes transformaciones, resultarán distintas losetas y motivos (A). *Si se aplican a una curva distinta, el motivo será el mismo, pero la loseta será diferente* (B). *En ocasiones, el método permite generar losetas con distintas formas* (C). *Se pueden utilizar triángulos equiláteros para especificar las transformaciones* (D). *Si se le aplican a la generatriz las rotaciones que vemos en la figura de 4 triángulos, resultan losetas que encajan en un motivo triangular*

Acuse de recibo

Han sido varios los artículos recientes dedicados a formas topológicas. Josiah Manning me ha enviado una notable variante de la banda de Möbius, banda que normalmente se construye retorciendo media vuelta una tira de papel y pegando los extremos. La banda de Möbius tiene un solo lado y un solo borde. Otro tanto vale para la figura de Manning (*abajo*), aunque a primera vista no parece una banda de Möbius normal, pues las tiras se bifurcan.

Los topólogos, sin embargo, han aprendido a no confiar en lo que ven. Para ellos, una taza de café tiene la misma forma que una rosquilla, porque una y otra tienen un agujero, la rosquilla, en su centro, y la taza, en el asa. ¿Es la elegante superficie de Manning topológicamente equivalente a una cinta de Möbius, o no? Si fuera de goma, ¿podríamos convertirla en una cinta de Möbius típica estirándola, doblándola o sometiéndola a otras deformaciones continuas? A tener presente: para determinar la equivalencia también es lícito cortar la figura, siempre y cuando más tarde se vuelvan a unir las partes de modo que los bordes cortados queden unidos de la misma forma que lo estaban antes. (Se permite esta operación porque una misma forma topológica puede estar inmersa de distintos modos en el espacio que la rodea.) Revelaré la respuesta en un artículo futuro. —*I.S.*



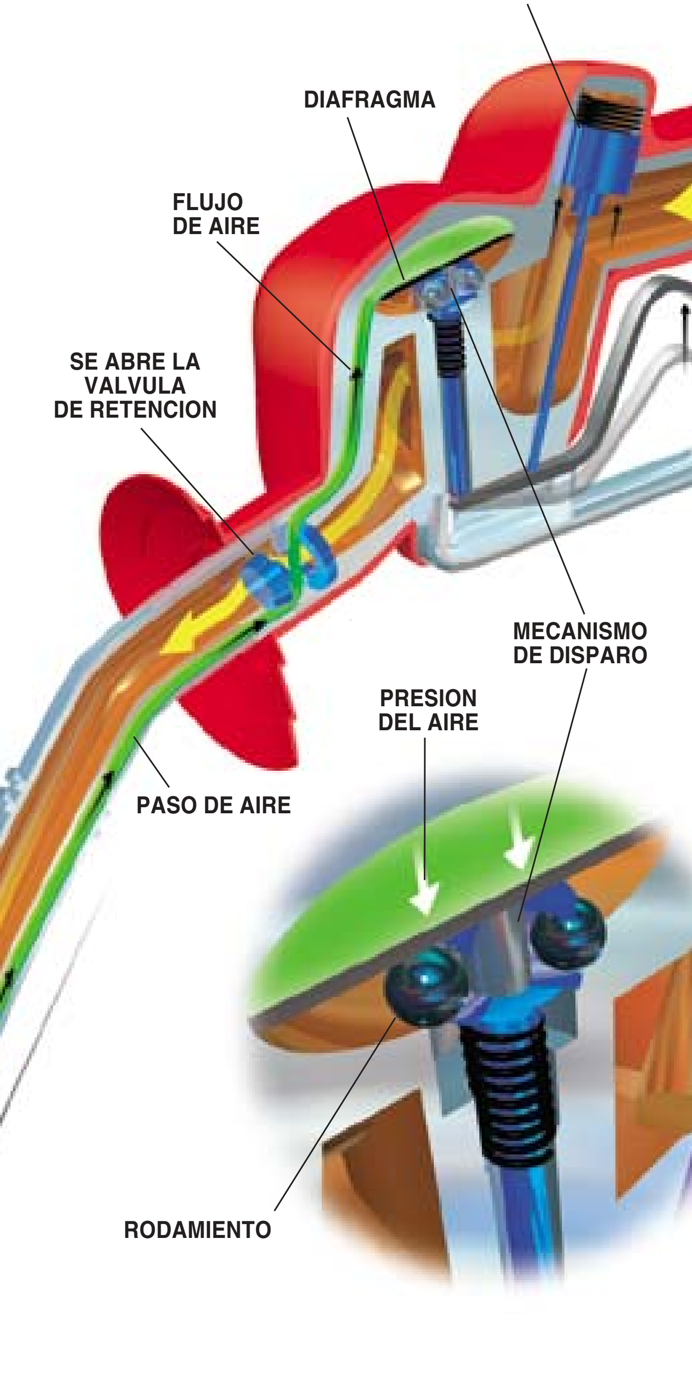
Marguerite Holloway

Gasolineras de autoservicio: boquillas
Lleno, por favor

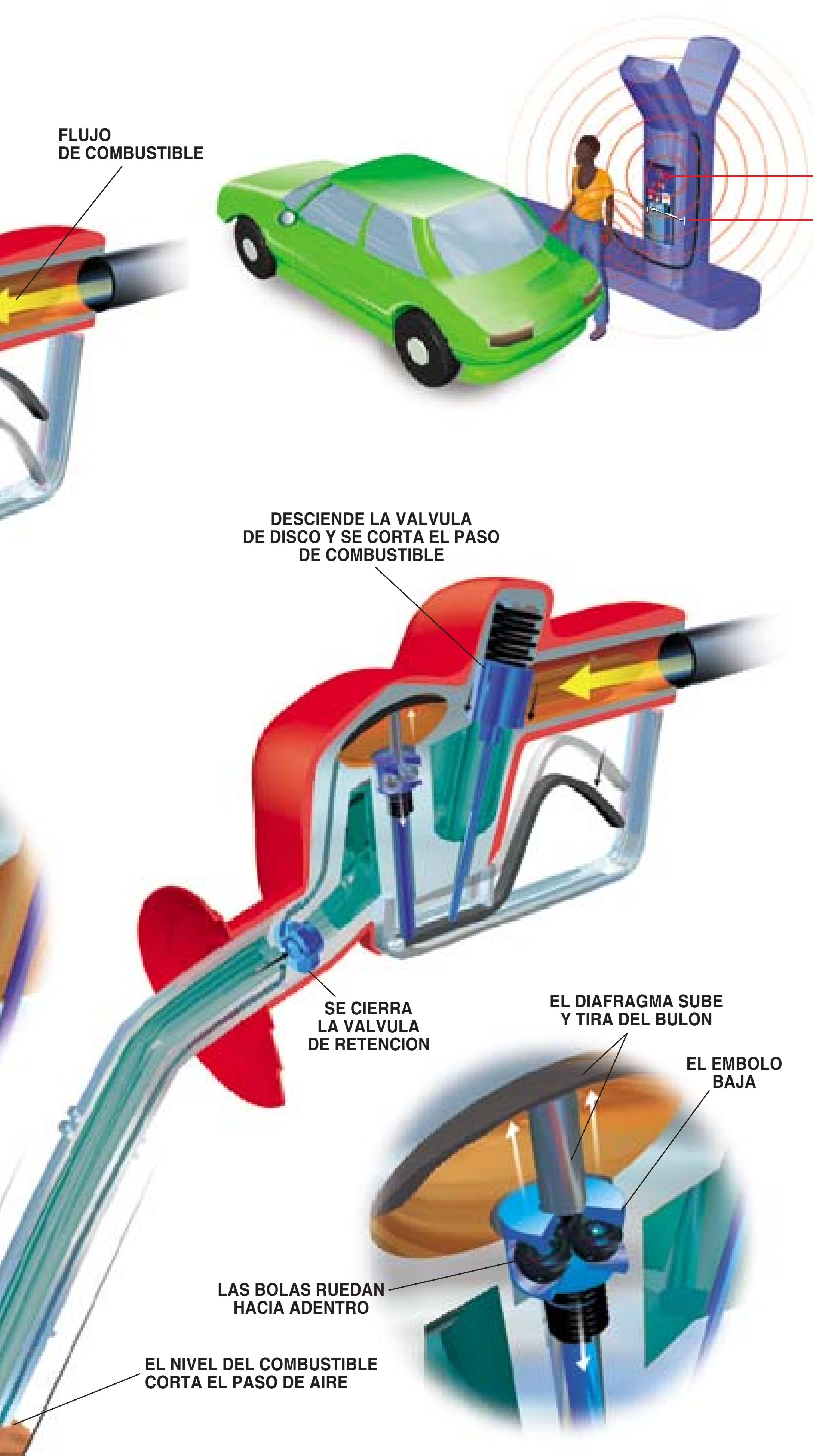
En España y otros países suelen ser los propios clientes los que manejan los surtidores de las gasolineras, una técnica de autoservicio que apenas ha cambiado desde 1947, cuando parece que dos californianos propusieron la idea más o menos a la vez.

Los surtidores de autoservicio están casi por completo controlados electrónicamente. Tal como explica Matthew C. Schuessler, de Marconi Commerce Systems, fabricante de surtidores de Greensboro, cuando un cliente alza el mango de la bomba o pulsa un botón en el surtidor, el cuadro de control situado en la parte superior del surtidor recibe una señal. El cuadro pone a cero el indicador del contador, informa al operador de la estación de que hay un cliente y conecta el cuadro de la interfaz hidráulica, a través del cual regula la corriente de combustible procedente de una cisterna enterrada. (Se pone un gran cuidado en separar la electrónica y la hidráulica de los surtidores mediante un espacio de aire o una sustancia tipo epoxia para reducir el riesgo de que una chispa provoque una explosión.)

La interfaz hidráulica alimenta de energía a una bomba de turbina sumergida en la cima de la cisterna enterrada, cuya capacidad suele ser de unos 40.000 litros. El flujo de combustible se inicia con un hilillo de líquido, cuyo paso por un medidor hace girar un disco que, tras cada vuelta, envía un impulso eléctrico al cuadro de control de la bomba. Después de 10 impulsos, empieza el flujo rápido. Cada 250 impulsos representan un litro, lo que permite al controlador de la bomba saber cuánto combustible se ha servido. Si, en esa venta, el cliente ha especificado un volumen o una cantidad de dinero máximos, el controlador calcula cuándo se llega a ello y le dice a la interfaz hidráulica que pare la turbina y cesa el flujo de combustible.



LA BOQUILLA, pese a toda la electrónica incorporada a los surtidores de autoservicio, sigue siendo un dispositivo mecánico. Se diseñan para que se paren automáticamente al llenarse el depósito que están sirviendo. Según Husky Corporation, fabricante de boquillas de Pacific (Minnesotta), la corriente de combustible por la válvula de retención crea una zona de baja presión, la cual succiona el aire contenido en el depósito del vehículo a través de un tubo de respiración. Cuando en el depósito el nivel del combustible llega al sensor de la boquilla, se bloquea el paso de aire por ese tubo. La acción de la baja presión ya no se ejerce entonces sobre la válvula de retención, sino sobre un diafragma, y se libera una mecanismo de disparo que deja caer una válvula de disco que corta el paso de combustible.



¿Sabía Ud. que ...?

- Las gasolineras recurren cada vez más a la identificación por radiofrecuencia. Los clientes pueden así pagar sin tarjeta de crédito ni efectivo. Según *National Petroleum News*, los clientes deben disponer de un transmisor en el vehículo o de un identificador en una cadena de llavero. El transmisor emite una radioseñal al surtidor con los datos personales y de la tarjeta de crédito. En el caso del identificador, éste se agita frente al surtidor, donde un receptor procesa la información.

- Para que los clientes nocturnos se sientan más seguros, algunos de los surtidores que actualmente están diseñando Marconi y otras compañías serán más bajos y estrechos. Estas nuevas versiones dificultan la ocultación a los posibles asaltantes.

- Pese al cuidado en garantizar la seguridad de las gasolineras, las chispas eléctricas accidentales pueden provocar incendios. Según Robert N. Renkes, del Petroleum Equipment Institute en Tulsa, durante los dos últimos años, por ejemplo, en todo EE.UU. hubo al menos 100 fuegos en gasolineras, que causaron una muerte y numerosas lesiones graves. Parece que en muchos casos el culpable fue la electricidad estática, que a veces los clientes captan al frotarse contra la tapicería de su vehículo, y que luego se transforma en chispa cuando se toca la boquilla de la manguera o el tapón del depósito. Conviene que los clientes se pongan siempre a tierra tocando su vehículo antes de manipular el surtidor o de abrir el depósito.

- Las fugas de las cisternas (unas 400.000 en los últimos 10 años) son el principal contaminante de las aguas subterráneas en EE.UU. De esas cisternas, unas 380.000 están situadas en gasolineras. Desde 1998, la Agencia de Protección del Medio Ambiente exige que estén protegidas contra la corrosión y que posean sensores a los hidrocarburos que alerte de las fugas a sus dueños. Afirma Sammy Ng, de la Agencia, que aproximadamente un 15 por ciento de las cisternas enterradas siguen sin cumplir la norma.

NEXOS

James Burke

"¡Qué frescura!"

De Beethoven y Dickens a la química de la orina y al "siderismo". No todo en ciencia termina en premio Nobel

En esta sección me comprometí, tal vez precipitadamente, a repasar con mayor detenimiento al representante de Beethoven y el hecho de que la nieta del músico se casara con Charles Dickens. Resulta que el representante en cuestión (un escocés llamado George Thomson) era algo más que un fresco. Su habilidad musical (además del violín) radicaba en un extraño talento natural para persuadir a grandes compositores de que la música popular que él había recopilado no era lo bastante buena y que precisaba retoques de tipo sinfónico. O de que los poemas que había copiado de labriegos escoceses necesitaban melodías actualizadas y pegadizas del nuevo género romántico. Beethoven se encargó de más de cien de tales piezas, algunas de las cuales Thomson rechazó porque no le parecieron de suficiente calidad. Desvergüenza no le faltaba.

Volvamos a la nieta de Thomson y a Dickens, que también tuvo su parcela de trabajo complementario. En 1859, cuando ya era una celebridad literaria internacional por bombazos como *The Pickwick Papers* y *Martin Chuzzlewit*, Dickens escribió para una revista modesta un artículo sobre un idilio rural en el que aparecían los personajes de Fray Bacon y sus braceros. En la vida real se trataba de John Bennet Lawes, señor de Manor Rothamsted, al norte de Londres, y de los habitantes de un pueblo cercano. Los que tengan inclinaciones ecológicas sabrán ya que Rothamsted fue y aún es el lugar de la primera estación de investigación agraria. Fundada por Lawes en 1843 acogió trabajos relacionados con asuntos bucólicos desconcertantes, como las aparentes propiedades fertilizantes de los huesos en unos suelos y no en otros. Lawes fabricó superfosfatos y amasó una fortuna, junto con el químico y tuerto Joseph Henry Gilbert.

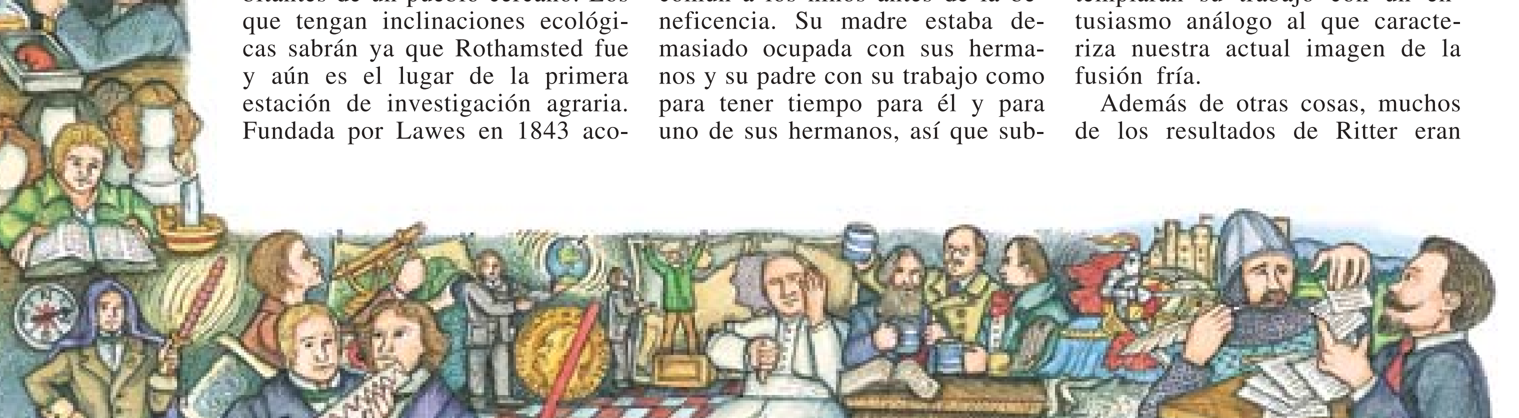
Que sabía más que muchos sobre la alimentación de las plantas, tras haber pasado una temporada en el nuevo laboratorio de Justus von Liebig, el rey de los abonos, en Giessen. Gilbert coincidió allí con un tal John Augustus Völker, que tampoco era un vago en asuntos de podridero y con el que sin duda pudo intercambiar impresiones sobre los corrales. Por cierto que dos de los mejores artículos de Völker contra el insomnio merecen especial atención: "Sobre el abono líquido" y "La química de la remolacha azucarera silesia". Völker conocía sus cebollas (y remolachas, imagino) porque había estudiado con la persona a quien el gran Liebig había eclipsado. El infortunado fue Friedrich Wöhler, sombra de Liebig durante toda su vida, amigo y autor de la inmortal sentencia comunicada a otro grande de la química, Jöns Jacob Berzelius: "Ahora ya no puedo retener mi orina química." Fue esto cuando había tenido éxito en la síntesis de urea sin la ayuda de un riñón. Y luego se dedicó a desarrollar un método para aislar el aluminio.

Wöhler era un químico que estaba alcanzando cosas que a los otros les estaban vedadas. Uno de estos otros resultó ser un danés que, como tantos, habían fracasado con el aluminio y que había sufrido el destino lamentablemente común a los niños antes de la beneficencia. Su madre estaba demasiado ocupada con sus hermanos y su padre con su trabajo como para tener tiempo para él y para uno de sus hermanos, así que subcontrataron la educación de los chicos a un emigrante alemán hábil en pelucas. Hans Christian Ørsted (el chico químico en cuestión) aprendió por su cuenta el alemán leyendo la Biblia del peluquero, para luego entusiasmarse con la postrera ensoñación filosófica germana: todo ese asunto de la *Naturphilosophie* de los románticos de Jena sobre la evolución de la naturaleza en busca del equilibrio de fuerzas opuestas.

Así inspirado, Hans Christian pasó (como algunos lectores ya sabrán) a descubrir en 1819 que un alambre cargado está rodeado por un campo magnético: electromagnetismo. Resulta interesante para nuestra historia el que Ørsted postulara una especie de teoría de la gran unificación del tipo "Que la fuerza os acompañe" ya en los primeros años del siglo XIX.

Ciertamente, esta materia especulativa lo unió con alguien cuya breve vida (murió a la edad de 33 años) puede describirse, en el mejor de los casos, como agotadora. En sus 13 años de trabajo, Johann Wilhelm Ritter (otra de esas chispas animadas por Alexander von Humboldt) produjo un alud de artículos de investigación. Lamentablemente, no causaron la menor impresión en sus contemporáneos. Muchos de sus descubrimientos (en electrofisiología y electroquímica) serían redescubiertos más tarde y de forma independiente por otros. El pobre Ritter estaba sencillamente en el lugar equivocado en el momento impropio. Téngase en cuenta que su caso no mejora por el hecho de que algunos de sus colegas contemplaran su trabajo con un entusiasmo análogo al que caracteriza nuestra actual imagen de la fusión fría.

Además de otras cosas, muchos de los resultados de Ritter eran



decididamente irreproducibles, como los electrizantes experimentos que efectuó consigo mismo para desentrañar los efectos de un alto voltaje sobre la percepción. Ritter también estaba interesado en fenómenos algo “extremos”: la hidromancia, el hechizamiento de los metales y la oscilación de las espadas (no estoy muy seguro de qué se podía tratar en los dos últimos casos).

Para culminar su ostracismo ante la corriente científica establecida, Ritter postuló un tipo especial de electricidad subterránea, análoga al geomagnetismo. Y para acabar de liarlo, afirmó haber descubierto un principio general que gobernaba la interacción entre la materia inorgánica y los fenómenos humanos al que llamó “siderismo” e inició la edición de una nueva revista dedicada al tema, cuyo primer número sería el último. Luego Ritter murió. No todo en ciencia termina en premio Nobel.

Parte del problema de Ritter puede haber radicado en su gurú Franz von Baader. Antiguo ingeniero de minas reconvertido en espiritual y ecumenista. Como católico conservador, Baader tenía dos intenciones gemelas en la vida: reconciliar razón y revelación e intentar unir Europa en una sola comunidad bajo una Iglesia universal. A cuyo fin hizo cuanto pudo para promover lo que en 1815 se convirtió en la Santa Alianza de Rusia, Austria y Prusia, constituida tras la derrota final de Napoleón y con el objetivo de revertir las tendencias liberales y nacionalistas que Napoleón había despertado por doquier. A pesar de ello, este agradable y represivo acuerdo no sentó bien al Papa.

Ni a George Canning, secretario de asuntos exteriores de Gran Bretaña, que minó las posibilidades de la Santa Alianza siempre que pudo. Canning fue una de esas testas brillantes que aparecían antes de que la política fuera una cuestión debidamente democrática. Excelente pluma y elegante orador, trabó en Eton una amistad perdurable con George Ellis, que colaboró en la fundación de una de las mejores revistas de crítica literaria de todos los tiempos, el *Quarterly Review*. A través de Ellis, en 1806 Canning frecuentó a uno de los escritores más magistrales de la revista, Sir Walter Scott.

Por entonces Scott era una estrella en ascenso. Su reciente *La canción del último trovador* alcanzaba un doble motivo de envidia (fama y fortuna) y su siguiente mega-best-seller *Waverley* estaba ya en camino. Scott recibiría un título nobiliario, la amistad del rey, una casa majestuosa en Escocia y la adoración rendida de las clases ociosas de Europa y América. Exactamente el último tipo al que recurrir, si lo que se tuviera en mente fuera que retocara unos aleluyas para adaptarlos a las viejas melodías populares que uno hubiera coleccionado. Así que, tal vez, la mención de Beethoven ayudó. Fuera lo que fuera, el gran Sir Walter realmente encontró tiempo para garabatear unos versos para ese egregio George Thomson con quien yo empecé la página.

Los caraduras no pierden ocasión. QED.

Ciencia medieval

Traducción y creación

AUX ORIGINES DU LEXIQUE PHILOSOPHIQUE EUROPÉEN. L'INFLUENCE DE LA *LATINITAS*. Dirigido por Jacqueline Hamesse. Fédération Internationale des Instituts d'Etudes Médiévales; Louvain-la-Neuve, 1997. **MEDIEVAL PHILOSOPHY.** Dirigido por John Marenbon. Routledge; Londres y Nueva York, 1998. **WILLIAM OF SHERWOOD. INTRODUCTIONES IN LOGICAM. EINFÜHRUNG IN DIE LOGIK.** Edición crítica, versión alemana y anotaciones de Hartmut Brands y Christoph Kann. Felix Meiner Verlag; Hamburgo, 1995.

THE ARABIC VERSION OF EUCLID'S *OPTICS* (KITAB UQLIDIS FI IKHTILAF AL-MANAZIR). Edición crítica de Elaheh Kheirandish. Springer; Nueva York, 1999. **UN TRAITÉ MÉDIÉVAL SUR LES CARRÉS MAGIQUES. DE L'ARRANGEMENT HARMONIEUX DES NOMBRES.** Edición preparada por Jacques Serrano. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes; Lausanne, 1996. **THE KALENDARIUM OF JOHN SOMER.** Edición preparada por Linne R. Mooney. The University of Georgia Press; Athens, 1998.

THEATRUM SANITATIS. Traducción de José Miguel García Calero e introducción general de José María López Piñero. M. Moleiro Editor; Madrid, 1999. **MEDIEVAL EMBRIOLOGY IN THE VERNACULAR. THE CASE OF DE SPERMATE,** por Päivi Pahta. Société Néophilologique; Helsinki, 1998.

En buena parte del mundo académico empieza a calar la nueva visión que de la Edad Media nos ofrece la investigación histórica. Rémora, prejuicio e ignorancia se conjugan en el mantenimiento del viejo estereotipo "mondain" de una época obscura. Tras decenios de estudio surge un cuadro en el que sobresale el talante de apertura a la naturaleza y sus obras que culmina en la creación de las universidades. Quienes a éstas acuden les mueve la misma inquietud que mostraba el sobrino de Adelardo de Bath, figura señera del siglo XII: "¿Cuál es la causa de que las plantas broten de la tierra?"

Una aproximación ceñida requiere familiaridad con el lenguaje y el mundo conceptual al que remite. Nos facilitan la tarea *Aux Origines du Lexique Philosophique Européen. L'influence de la* Latinitas y *Medieval Philosophy*.

La ciencia del Occidente medieval se fundaba en el saber de la antigüedad clásica y en la reelaboración del mismo a través del Islam que empezó en el siglo octavo. Merced a las versiones árabes, la formación musulmana limitada en un comienzo al estudio del Corán y la *Hadith* dilató su horizonte cultivando las ciencias profanas. Dado el carácter no confesional de las segundas, cristianos y judíos intervendrían en su desarrollo conjunto. Hunain ibn Ishaq (808-73) encabezó un equipo de traductores en Bagdad que, sumados a otros esfuerzos, vertieron los textos griegos e hindúes —científicos y filosóficos— que pudieron recoger, y no fueron pocos, en su vertiginosa conquista. Hacia finales del siglo IX se disponía ya en árabe de los *Elementos* de Euclides, escritos de Arquímedes, las *Cónicas* de Apolonio de Pérgamo, la *Aritmética* de Diofanto, textos de Pappus, la astronómica *Mahasiddhanta* hindú y las tablas de Pahlavi.

El latín de la filosofía y la ciencia medievales no es sólo deudor del latín clásico, sino también de los avatares de la historia. A él se trasladaron libros griegos, siríacos, árabes y hebreos, tarea que no anduvo exenta de dificultades y obligó a la invención de numerosos neologismos. En el recurso a la etimología para crear nuevas palabras no se acertó siempre. (Motivo habitual de las invectivas humanistas.) Pero es de justicia reconocer que sin el tránsito al latín medieval buena parte de nuestro patrimonio cultural hubiera desaparecido. Surgieron centros de traducción en Sicilia y reino de Nápoles para los textos científicos y filosóficos, en Salerno para los textos médicos y en Toledo para las fuentes árabes.

Sirva de ejemplo paradigmático el vocabulario de la demostración en las versiones de los *Elementos* de Euclides asociadas a Adelardo de Bath. El *locus classicus* sobre el método demostrativo son los *Analíticos Posteriores* de Aristóteles. La demostración ("apodeixis") procede de las premisas a la conclusión; aquéllas son ciertas, primeras, inmediatas, anteriores y mejor conocidas que ésta. La conclusión se relacionará más tarde con las premisas como el efecto a la causa. La ciencia que encarna por excelencia el método demostrativo (método axiomático o deductivo) es la geometría. Tan nuclear es el asunto en los *Analíticos Posteriores*, que la obra entera se conoció en árabe como "Libro de la demostración" y, vertida ésta al latín por Gerardo de Cremona en el siglo XII, *Liber de demonstratione*.

De los *Elementos* de Euclides, la alta Edad Media conocía sólo una traducción de las definiciones, postulados, axiomas (nociones comunes) y enunciados de los cuatro primeros libros traducidos por Boecio. Pero dispondrían de una edición más completa gracias a Adelardo de Bath, quien vertió también las *Tablas astronómicas* de al-Khwarizmi, el *Compendio de la introducción a la astrología* de Abu Mashar, el *Centiloquium* de Ptolomeo y el *Liber prestigiorum* de Thabit ibn Qurra. Dan la impresión de ser "ejemplares de trabajo", no textos definitivos, en donde los términos árabes clave aparecen destacados en los márgenes para una intelección más ajustada.

La filosofía medieval es un río abastecido con afluentes árabes, judíos y cristianos. Avicena, Averroes, Maimónides, Eriúgena, Anselmo, Abelardo, Grosseteste, santo Tomás, Enrique de Gante, Duns Scoto, Pedro Aureolo o Guillermo de Ockham forman una pléyade de pensadores que resiste el paso del tiempo. Junto a ellos, figuras menos conocidas hilvanan una teoría lógica que despierta ahora interés creciente entre los analíticos, estimulado con el descubrimiento de manuscritos inéditos y el estudio de la textura argumentativa de las obras teológicas.

La corriente árabe, que emerge en el siglo nono, se cierra con la muerte de Ibn Rushd (Averroes) en 1198. La intolerancia subsiguiente abortó cual-

quier apunte de pensamiento independiente. Por su parte, la tradición judía, estrechamente vinculada a la islámica, florecerá también en las comunidades hebreas de la Europa cristiana, para declinar en el siglo XV.

La filosofía del Occidente latino comienza en la segunda mitad del siglo VIII, en la corte de Carlomagno, alcanza su apogeo en el XIII y su influencia llega hasta nuestros días. A modo de apéndice, quizá por desconocida, la filosofía cultivada en Bizancio, de orientación neoplatónica, quedó truncada con la caída de Constantinopla.

Resulta ahora evidente que las ideas de los lógicos medievales hallan encuadre en la lógica simbólica. En la segunda mitad del siglo XII, el Occidente latino recibe traducidos los *Analytica Priora*, los *Tópicos* y las *Refutaciones Sofísticas* de Aristóteles: la nueva lógica. Sobre todo el tercero, el dedicado a los argumentos incorrectos aunque plausibles en su superficie, fue estudiado con entusiasmo. Entre 1150 y 1200, los lógicos medievales rompieron con el corsé boeciano. Así, mientras que la *Dialéctica* de Abelardo había seguido la pauta de los manuales de Aristóteles, Porfirio y Boecio, el *Compendium* de Porretano reorganiza la disciplina en cuatro partes: términos, enunciados, significado de los términos y significado de los enunciados. Además de la teoría de los condicionales, se introduce la semántica.

Dado el papel catalizador desempeñado por la lógica, resultaba de todo punto natural una mirada inédita a la física en el siglo XIII. Destacaron pronto en ese empeño Robert Grosseteste y Guillermo de Auvergne. En su *Comentario a los Analíticos Posteriores*, Grosseteste sostiene que la verdad de una cosa consiste exclusivamente en su realidad externa. Para el de Auvergne, en su tratado *De universo*, la verdad objetiva de una cosa reside en su sustancia, su esencia o ser. Por lo que concierne al conocimiento científico, Grosseteste buscaba establecer "principios universales experimentales", es decir, premisas que sirvieran en la demostración. Experimentar significa provocar la realización de un fenómeno para comprobar si se da una relación de causa a efecto. Ideal científico que lleva a su máxima conceptualización Roger Bacon, quien sitúa la matemática en los fundamentos de la ciencia natural, si no de la ciencia entera. La matemática aporta la explicación razonada *(per causam)* de los fenómenos que las ciencias naturales sólo describen como hechos (*per effectum*).



Hasta los 20 años los alumnos de las primeras universidades europeas seguían cursos de lógica y filosofía en las facultades de artes

Hacia mediados de esa centuria, Pedro Hispano, Lambert de Auxerre y William de Sherwood escribían sumarios (*summulae*) que cubrían la lógica entera, donde incluían material aristotélico con nuevos desarrollos terministas. Las *Introductiones in Logicam* de Sherwood, el *Tratado de lógica* de Hispano y la *Lógica* de Auxerre siguen la tradición antigua a la que agregan incorporaciones escolásticas de la lógica moderna.

Sobre la personalidad de Sherwood existen pocos datos e información. Nacido entre 1200 y 1210, lo encontramos en 1552 dando clases en Oxford. Si parece cierta su influencia sobre Alberto de Colonia y Tomás de Aquino, menos sólida es la tesis de que durante su posible estancia en París inspirara los manuales de Hispano y Auxerre.

Las *Introductiones*, que parten de las cuestiones planteadas en el *De interpretatione* aristotélico, siguen a Boecio en el análisis del enunciado hipotético. Tras un breve repaso a los predicables se detiene en la silogística, núcleo central de la lógica aristotélica. Pero es en la doctrina de los términos, y su papel en tanto que sujetos o predicados de los enunciados, y en las falacias donde evidencia el nivel de avance de la lógica del siglo XIII. No sólo distingue entre palabras categoremáticas (descriptivas) y sincategoremáticas (lógicas), sino que muestra, además, que unos términos se usan categoremáticamente en unos contextos y sincategoremáticamente en otros. Reconoce la importancia del orden de las palabras y del alcance de los funtores lógicos.

La lógica medieval tardía comenzó en torno a 1300 y persistió por lo menos hasta el siglo XV. Con algunas notables excepciones sus contribuciones más originales se realizaron en torno a 1350, sobre todo en Oxford. Brillan en esos años Walter Burley y Guillermo de Ockham. Ambos realizaron notables aportaciones a la teoría de la suposición y Ockham en particular desarrolló teorías refinadas del "lenguaje mental" y la "connotación". Richard Kilvington y William Heytesbury aplicaron las técnicas de los sofismas a la filosofía natural y

la lógica epistémica. Thomas Bradwardine escribió unos *Insolubles* que fueron quizás el tratado más influyente de toda la Edad Media sobre paradojas semánticas.

Un capítulo fascinante de la historia de la ciencia es el de la transición del griego *optika* al árabe *al-manazir*. La *Optika* de Euclides (c. 300 a.C.) fue la primera obra que nos ha llegado dedicada por entero a la cuestión, transmitida en condiciones mucho mejores que la homónima de Ptolomeo, compuesta en el siglo II de nuestra era. La *Optika* atribuida a Euclides desde Proclus es, sin embargo, un trabajo elemental sobre perspectiva. Su traducción al árabe implicó transformaciones textuales en términos y expresiones fundamentales.

Tras la publicación de *Kitab al-Manazir* (*Libro de Optica*) de Ibn al-Haytham (siglo XI), única en su ecléctica asunción de partes de Euclides y Ptolomeo, se hace imperiosa la aplicación de métodos experimentales al estudio de la reflexión (catóptrica) y refracción (dióptrica). En ese horizonte hay que interpretar la transmisión del *Kitab al-Manazir* de Euclides, ahora editado espléndidamente por Springer en dos volúmenes, reservado el primero para el texto árabe y su traducción inglesa, y el segundo, al comentario textual e histórico.

The Arabic version of Euclid's Optics (Kitab Uqlidis fi Ikhtilaf al-manazir) refleja la aventura compleja de las consecuencias de una versión harto liberal para el desarrollo del campo. En puridad histórica no existió "la traducción" árabe de ese libro de Euclides. Cierto es que la *Optika* de la tradición árabe remitía a una misma personalidad, a Euclides, en cuya autoría decían descansar las muy dispares versiones. Pero se trataba, incluso en sus variaciones más afines, de transformaciones de la teoría euclideana de la visión.

Ello no hace sino resaltar el valor del trabajo realizado por Elaheh Kheirandish, quien ha rastreado los textos fundantes de la tradición, la larga serie de manuscritos dependientes de ésta y la gavilla de escritos afines. Entiende que las dos obras decisivas son ciertos manuscritos de la época del califa abásida al-Mamun (813-833), que ella somete a finísimo análisis.

22	47	16	41	10	35	4
5	23	48	17	42	11	29
30	6	24	49	18	36	12
13	31	7	25	43	19	37
38	14	32	1	26	44	20
21	39	8	33	2	27	45
46	15	40	9	34	3	28

Cuadrado mágico que aparece en la obra de Diego Palomino Fragmentum de inventionibus scientarium*, de 1599*

Del progreso en matemática logrado por los árabes y, en particular, del desarrollo en teoría de números da fe *Un traité médiéval sur les carrés magiques, De l'arrangement harmonieux des nombres*, reproducción, traducción y comentario de un manuscrito anónimo del siglo XI. Esta edición se ha realizado a partir de dos ejemplares conservados en Estambul; contiene uno el texto completo, fragmentario, aunque más antiguo, el otro.

Se llama cuadrado mágico al formado por números enteros, de modo que son iguales las sumas de los números de cada fila, de cada columna y de las dos diagonales. El cuadrado que tenga n casillas por lado, y, por tanto, n^2 en total, se llamará de orden n. Se denominará suma mágica a la cantidad $2n + 2$.

Los árabes supieron conjugar la matemática mesopotámica, griega e hindú. El saber *mesopotámico*, que se remontaba a los sumerios, recogido por los acadios y luego transmitido por la antigüedad helenística, permitía la resolución de las ecuaciones y sistemas de ecuaciones algebraicas de primer y segundo grado. La *India* contemporánea estaba desde hacía poco en posesión del sistema de numeración. Y, por último, tradujeron al árabe los grandes textos matemáticos *griegos*. Parece hoy probado que la ciencia de los cuadrados mágicos se hallaba bien asentada en el mundo árabe hacia el año mil.

Si en el comentario de al-Antaki (muerto en 987) a la *Introducción a la aritmética* de Nicómaco hallamos una sección sobre la construcción de los cuadrados mágicos, aunque sin justificación teórica, el matemático persa Abul-Wafa al-Buzjani (940-997/8) no perdona ya explicaciones sobre el origen de las construcciones.

La doctrina se recoge, madura, en la *Disposición armoniosa de los números*. Recuerda al comienzo algunas nociones fundamentales sobre números enteros, principalmente extraídas de los *Elementos* de Euclides, para indicar luego la disposición mágica de la secuencia de enteros de 1 a n^2, que los sitúa sucesivamente de acuerdo con el orden, distinguiéndolos a veces según su paridad. Para ocuparse, por último, de los números que no son ni consecutivos ni guardan progresión aritmética.

Si larga fue la sombra de la matemática árabe —"Nada hay más hermoso en Aritmética que esos números que algunos llaman planetarios y otros mágicos", consideraba Fermat,

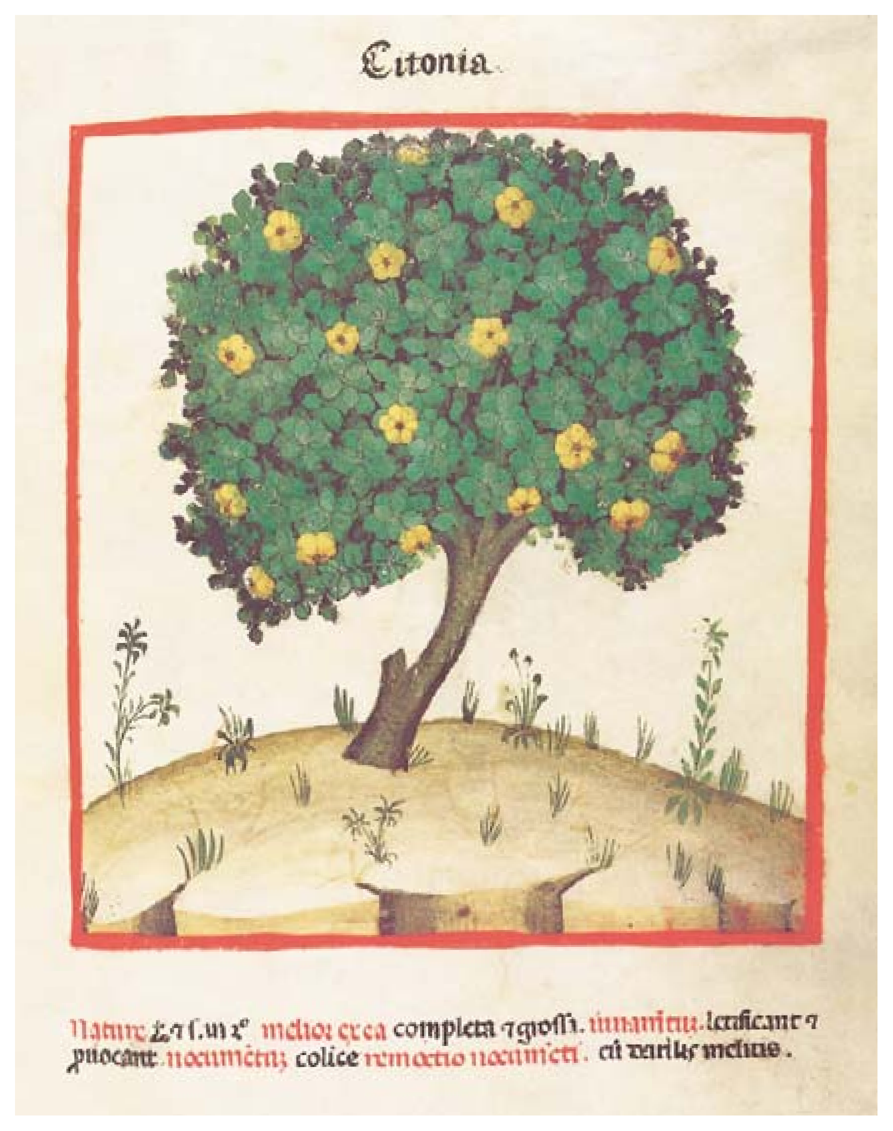
en carta a Mersenne—, no menos perdurable resultó la astronomía. De ella bebe en el siglo catorce un fraile franciscano estudiado por Linne R. Mooney en *The Kalendarium of John Somer*.

Somer compuso su calendario en Oxford en 1380 a ruego de su provincial Thomas Kingsbury. Otro fraile, Nicholas de Lynn, redactó el suyo unos seis años más tarde. Estos calendarios medievales eran una suerte de almanaque, un listado de días y meses de acuerdo con el calendario juliano; iban acompañados de tablas y textos en que se asocia con el calendario la astronomía y la práctica médica. Portaban tablas de conjunciones (de lunas nuevas) para los cuatro ciclos.

En su verosímil formación en Oxford, Somer tendría acceso a la escuela de astronomía del Merton: maestros, libros y equipo. Allí había sentado cátedra John Mauduit, cuyos escritos sobre la materia incluían numerosas tablas astronómicas corregidas de la longitud y latitud de Oxford. Pero fue más brillante la generación de astrónomos y matemáticos contemporáneos de Somer: Simon Bredon, autor de una *Theoria planetarum*, John Ashenden, quien compiló una *Summa iudicialis de accidentibus mundi*, o William Rede, en cuyas *Pronosticationes* se ocupa de eclipses de la luna y de conjunciones planetarias.

A Somer se le atribuyen correcciones de calendarios precedentes (*Castigationes*) y textos sobre el movimiento del Sol y los planetas. El *Kalendarium*, su obra principal, consta de cuatro partes: prólogo y canon introductorio, que abarca instrucciones para el uso de tablas de bisiestos y fiestas móviles, del calendario mensual y de las tablas de eclipses; el calendario mensual con las dos primeras de estas tablas; tablas adicionales con cánones separados y el hombre zodíaco con el texto explicatorio acompañante; y, por último, las tablas de eclipses.

Otro tipo de tablas, higiénicas en este caso, eran comunes en la enseñanza y praxis médica. Aparecían en los regímenes de salud. Denuncia López Piñero en su introducción sobria y cabal al *Theatrum sanitatis* que la valoración negativa de la Edad Media constituye un grave obstáculo para situar de forma adecuada el contenido de este códice miniado de la Biblioteca Casanatense romana. La principal barrera consiste en suponer que la medicina medieval era un conjunto de supersticiones y hechicerías.



Pintura de un membrillo en flor que aparece en Theatrum sanitatis*, con las propiedades al pie*

El *Theatrum sanitatis* y la serie de códices miniados a la que pertenece no tiene ninguna relación con la medicina creencial, sino que son atlas de lujo destinados a divulgar entre los nobles las normas higiénicas de la medicina racional, galénica (la doctrina de las cualidades opuestas y los grados), de la baja Edad Media.

El saber médico se compendiaba en la *Articella*, que se abría con los *Aphorismi* y *Prognostica* de Hipócrates e incluía la *Isagoge* de Hunain ibn Ishaq. Distinguíase aquí entre cosas naturales, es decir, el cuerpo, sus partes y sus facultades; cosas preternaturales, a saber, las enfermedades, sus causas y sus síntomas, y cosas no naturales. En el postrer grupo se numeraban el aire y ambiente, la comida y bebida, el ejercicio y descanso, el sueño y vigilia, las excreciones y secreciones y los "afectos del ánimo". A esos seis pares "principales", Arnau de Vilanova añade otros "seis consecuentes": "región o lugar", "coito", "trabajo u ocupación", "juego", "baño" y "costumbre".

Los pies explicativos de las pinturas del *Theatrum sanitatis* son un resumen de la traducción latina de la obra *Taqwin al-sihha*, escrita en árabe por el médico cristiano del siglo XI Abul Hasan al-Mutjar ibn Butlan. El término Taqwin, "exposición en forma de tablas", fue transliterado al latín como *tacuinum* o *tacuinus*.

Las pinturas del *Theatrum sanitatis* representan aspectos de la vida humana con cuya reglamentación se pretende conservar la salud y prevenir la enfermedad. Las plantas se ilustran en su medio, sembrados, jardines y, a veces, con la presencia de animales y personas.

Derivadas parciales y física teórica

THE ACTION PRINCIPLE AND PARTIAL DIFFERENTIAL EQUATIONS, por Demetrios Christodoulou. Princeton University Press; Princeton, 2000.

Este libro, del mayor interés para especialistas en ecuaciones en derivadas parciales y física teórica, recupera una senda perdida en la teoría de ecuaciones en derivadas parciales, conectando directamente problemas y técnicas actuales con la obra de Noether.

El principio de acción de Lagrange llevó al desarrollo tanto de la geometría simpléctica como de los métodos de Hamilton para el estudio de las ecuaciones del movimiento. En el tratamiento clásico, la variable (el tiempo) tiene como dominio la recta real y, en consecuencia, las ecuaciones diferenciales resultantes (ecuaciones de Euler-Lagrange) son ecuaciones diferenciales ordinarias.

La extensión del principio de acción a una variable multidimensional con dominio en una variedad diferenciable hace que las ecuaciones de Euler-Lagrange sean ecuaciones en derivadas parciales; el principio de Dirichlet, que proporciona el ejemplo más simple de esta generalización, estimuló, a partir de un trabajo esencial de Hilbert, el estudio del cálculo de variaciones en varias variables.

Más tarde, en *Die Grundlagen der Physik*, Hilbert estudió el principio de acción cuando la variedad dominio es el espacio-tiempo y de él obtuvo las ecuaciones de la relatividad general de Einstein. Esta forma general del principio de acción sigue siendo un tema central en física teórica.

El caso en que las ecuaciones de Euler-Lagrange son de tipo elíptico ha sido muy estudiado en este siglo. Su consecuencia más llamativa es el problema de superficies de área mínima y sus generalizaciones; en cambio, el caso hiperbólico, pese a estar presente en muchos problemas de la física, no ha corrido la misma suerte y ha habido en él pocos avances significativos desde la obra de Noether en 1919.

El objetivo del libro de Christodoulou es llenar este vacío. Su primer capítulo presenta los conceptos básicos de la teoría, siempre desde un punto de vista global y con énfasis especial en los aspectos geométricos. En el segundo se estudia la geometría simpléctica, desarrollando una teoría de flujos multidimensional en analogía con la hidrodinámica clásica. En el tercero se extiende el trabajo de Noether, desarrollándose la teoría de corrientes compatibles bajo la forma de una teoría general de identidades integrales que cubre el hueco entre el caso de dos variables y el general.

El capítulo 4 dota de un carácter intrínseco a la teoría substituyendo la incógnita por una sección de un fibrado sobre la variedad dominio. En el capítulo central, el quinto, se da una buena noción de hiperbolicidad que permite superar las dificultades de la presencia de singularidades en la variedad característica y se prueba la aplicabilidad de la teoría a la elasticidad no lineal sin las restricciones de la teoría de Leray.

El último capítulo se dedica a la electrodinámica de medios no continuos; en él se obtienen los primeros resultados que van más allá de la aproximación lineal conocida hasta el momento. —JOSÉ M. AROCA

Pero el galenismo medieval tampoco olvidó otras cuestiones fundamentales en que se daban la mano filosofía y medicina, Aristóteles y el de Pérgamo. Abunda en ello Päivi Pahta en *Medieval Embriology in the Vernacular. The Case of De spermate*. Si Aristóteles destacaba la importancia para la filosofía de la naturaleza tener una visión clara de los primeros principios de la salud y la enfermedad, igual que los médicos más conspicuos comienzan con una consideración de la naturaleza, para Galeno el médico ideal era también filósofo.

De spermate se halla firmemente enraizado en ambas tradiciones. Ni que decir tiene que los procesos descritos y sus fundamentos teóricos no guardan ninguna relación con la genética actual. Tampoco deben esperarse. El texto podría haberse originado en la antigüedad tardía, y se atribuyó erróneamente a Galeno. La versión latina se difundió ampliamente en la Europa medieval y renacentista. La traducción inglesa medieval es la única versión vernacular conocida del texto. Sobrevive en lo que parece ser copia única en un manuscrito del siglo XV, en el Trinity College de Cambridge, MS R.14.52.

Desde muy pronto empezó la embriología experimental. Elegantes y precisos fueron los trabajos del mismo Aristóteles con huevos de pollo, para conocer el progreso del embrión. La versión árabe del libro de Galeno *De anatomicis administrationibus* habla de la disección de abortos por los anatómicos, quienes así comprobarían la constitución similar entre hombre y primates.

Sobre esa base laboran los medievales, empezando por el *Canon* de Avicena y el *al-Kitab al-maliki* de Haly Abbas, quien subraya la correlación planeta/mes. Con todo, la influencia de los planetas en el feto debe buscarse en *De humana natura*, un tratado traducido por Constantino, igual que *De coitu* y *De spermate*. La embriología científica adquiere renovado interés con el *De animalibus* de san Alberto, que depende de Aristóteles, aunque discrepe a propósito del papel de la mujer.

El estagirita se oponía a la doctrina de las dos semillas. En *De generatione animalium* reserva para el varón el principio activo de la concepción. Sostiene que el semen es un residuo de la sangre que sólo el varón puede producir en razón de su mayor calor interno (vital). La mujer no puede transformar la sangre en semen porque carece de calor innato, si bien contribuye algo a la formación y desarrollo del feto. El flujo menstrual serían la materia del feto.

Galeno rechaza que el menstruo sea la materia del embrión. Padre y madre, y es la doctrina recogida en *De spermate*, contribuyen por igual. Galeno cuenta ya con el descubrimiento de Herófilo de los ovarios de la mujer. Además, el poder coagulador es mayor en el varón y la capacidad receptiva mayor en la mujer. Aceptando el origen sanguíneo del semen, postula la intervención directa de los testículos en la reproducción. Estos y otros puntos, como la determinación del sexo, naturaleza y origen del esperma, desarrollo fetal, influencia general de los cuatro humores, la naturaleza del alma o la herencia de los caracteres, se abordan también en *De spermate*, un texto plagado, asimismo, de connotaciones pitagóricas y neoplatónica.

LUIS ALONSO

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



GALAXIAS ENANAS Y LOS BROTES DE FORMACION DE ESTRELLAS, por Sara C. Beck

Las galaxias diminutas experimentan en ocasiones brotes espectaculares de formación de nuevas estrellas. Estos brotes estelares proporcionan a los astrónomos una visión de la historia temprana del universo.

INTERPRETACION DE LOS HUESOS DE LA FLORIDA, por Clark Spencer Larsen

Nuevos estudios nos muestran la forma de vida de los nativos americanos después de la llegada de los europeos. Su salud empeoró, no sólo por las enfermedades, sino también por el cambio en la dieta y en las condiciones de vida.

COMPUTACION CON MOLECULAS, por Mark A. Reed y James M. Tour

Se han fabricado moléculas que actúan como conmutadores, cables e incluso elementos de memoria, pero la interconexión múltiple de los dispositivos presenta enormes dificultades.

INTERACCIONES POSITIVAS ENTRE PLANTAS, por Francisco I. Pugnaire y María José Moro

La asociación entre la retama y el marrubio en una zona semiárida del sur de España muestra que, más allá de la competencia darwinista, algunas plantas se procuran un mutuo beneficio.

COMUNICACION CELULAR, por John D. Scott y Tony Pawson

Hay en las células de nuestro organismo unas redes sutiles de comunicación interna sorprendentes. Si se llegara a descubrir el mecanismo de estructuración de los circuitos componentes habríamos dado un paso de gigante en la terapia de trastornos graves.

LOS TEXTILES DE LOS PRINCIPES CELTAS, por Christophe Moulherat

Los textiles descubiertos en las sepulturas aristocráticas de Europa central revelan la pericia técnica alcanzada por los celtas en el transcurso de la primera Edad del Hierro.

INFORME ESPECIAL: UNA NUEVA FORMA DE HACER LA GUERRA

LA PLAGA DE LAS ARMAS PORTATILES, por Jeffrey Boutwell y Michael T. Klare

Con unos pocos centenares de ametralladoras y morteros, un ejército reducido puede apoderarse de todo un país, matando e hiriendo a cientos de miles de personas.

HERIDAS INVISIBLES, por Richard F. Mollica

La investigación médica comienza a prestar atención a los efectos de la guerra sobre la salud mental de la población civil.

EL COSTE HUMANO DE LA GUERRA, por Walter C. Clemens, Jr. y J. David Singer

Las armas de guerra modernas matan más civiles que soldados.

LOS NIÑOS DEL FUSIL, por Neil G. Boothby y Christine M. Knudsen

¿Cómo se convierte a un niño en un asesino? Grupos armados de todo el mundo han adoptado una costumbre siniestra: arrebatan niños a sus familias, los habitúan a que se los maltrate y los "asciendan" a combatientes.

